

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



Departamento de Tecnología Electrónica

PROYECTO FIN DE CARRERA

**MÉTODOS ESTADÍSTICOS PARA LA MEJORA DEL PROCESO
DE FABRICACIÓN DE UN AVIÓN COMERCIAL**

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL
ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

AUTOR: DAVID MUÑOZ SÁNCHEZ
DIRECTOR: ISMAEL SÁNCHEZ

NOVIEMBRE, 2009

AGRADECIMIENTOS



Son muchas las personas que me han ayudado no sólo a lo largo del proyecto, sino a lo largo de la carrera. A todas ellas les quiero agradecer de una manera especial todo interés, sin el cual no imaginaría haber llegado hasta aquí.

Las primeras personas que me vienen a la cabeza son mi padre y mi madre, a quienes, de todo corazón, quiero dedicar el resultado final, no sólo del proyecto, sino de esta etapa de estudios que finaliza. Si hoy estoy delante del ordenador con la oportunidad de hacer esto, es por ellos. Por su sacrificio diario en intentar convertir a sus hijos en lo que ellos son, unos auténticos héroes. Gracias a los dos, porque vuestro sacrificio se verá recompensado, y enhorabuena porque el proyecto es más un reconocimiento hacia vosotros que hacia mi persona.

También quiero agradecer a mis hermanos el que hayan confiado siempre en mí. Han sido una referencia, un ejemplo al que seguir cuando he tenido que tomar decisiones. A Conchi, por ser quien nos ha abierto las puertas a los demás, y hacer que para los que venían detrás las cosas fuesen mucho más fáciles. A Lourdes, porque siempre me dado mucho más de lo recibido, y aunque vayan con retraso, muchas gracias por todo. A Damian porque al ser el más cercano en edad tenemos una conexión especial y en ocasiones lo veo mas como un padre que como un hermano. Siempre me ha exigido más y más, y me ha recordado, que no es cuestión de lo que hacemos sino de lo que podemos hacer. A Paloma porque a pesar de ser mi hermana política siempre se ha interesado por mis preocupaciones, estando ahí cuando le he solicitado y convertirse en alguien tan cercano como mis propios hermanos. A mis sobrinos Diego y Paula, por los buenos ratos que pasamos juntos, les agradezco la ilusión y alegría que me han aportado, y espero estar cuando me necesiten, al igual que sus padres lo han estado conmigo. No puedo olvidarme de mi familia política, José Luis, Esther y Vero, siempre me han prestado su ayuda cuando más lo necesitaba y me han hecho sentir como si fuera de su propia familia.

Una mención muy especial va destinada a todas las personas de la beca que he tenido la suerte de conocer desde que empecé a trabajar con ellos. A través de los consejos, experiencias y dedicación de todos ellos he ido conociendo el fascinante mundo de la aeronáutica, de modo que mi interés por ella no hace más que aumentar cada día. A Carlos González por su ayuda y su apoyo en el día a día, si el proyecto ha salido adelante a sido gracias a él, a su trabajo constante y continúa motivación.

A mis amigos, ellos me han enseñado lo que significa la palabra amistad. Con ellos he compartido los buenos y los malos momentos. Han dado importancia a lo que para mí lo era y han hecho grande lo que para mí debía serlo. Todos habéis valorado mi trabajo, mi esfuerzo, y eso para mí ha sido una gran recompensa. No abriré la lista por no dejarme a nadie fuera. Haré una excepción con Carlos por que empezamos juntos en San Fernando, continuamos juntos en la carrera, seguimos jugando juntos en el mismo equipo y los buenos momentos que hemos pasado nos convierten más en hermanos que en amigos. Al resto, os podría agradecer tanto, que lo dejaré para cuando haya unas cañas de por medio. Haré otra excepción con Tomas y con Toni porque a pesar del poco tiempo que hace que nos conocemos me han demostrado que son muy buenos “amigos”.

También he de premiar la amistad que tengo con los compañeros de carrera, porque juntos nos metimos en barco donde hemos compartido muchas cosas: ilusiones, decepciones, risas,... y aunque nos vamos bajando del barco, aquí todos seguimos remando. Juntos hemos aprendido a formarnos profesionalmente, y lo que es más importante, como personas. Aunque tampoco caeré en el error de dar nombres, haré otra excepción con Raúl, mi asistente gráfico particular, Juane, Richar y Edu. Ellos han sido mis compañeros de fatigas y siempre han estado cuando se les necesitaba.

A los profesores que a lo largo de mi vida, han participado en mi proceso educativo, debo reconocer la labor de Ismael, por haberme orientado a lo largo del proyecto y aconsejarme. Por haber confiado en mí desde el principio, y brindarme su dedicación cuando era necesario.

No puedo olvidarme de la persona que más me anima en todo lo que hago, y que siempre esta ahí incondicionalmente cuando la necesito. Miriam gracias por darme tu apoyo en los momentos difíciles, no sólo en este proyecto, sino en todo el tiempo que llevas a mi lado, compartiendo mi día a día, haciendo tuyas mis preocupaciones y magnificando mis pequeños logros. Me aportas ilusión, y las metas compartidas son lo suficientemente atractivas como para luchar por ellas. Espero estar ahí, al igual que tú lo has estado hasta ahora, y que después de todo este esfuerzo podamos celebrarlo con mucho más tiempo juntos.

A todas las personas mencionadas y a las que no se os nombra pero sabéis que estáis ahí, gracias, éste proyecto es también vuestro.



INDICE

Capítulo 1.	INTRODUCCIÓN.....	8
Capítulo 2.	EL MUNDO DE LA AVIACIÓN.....	11
2.1.	HISTORIA DE LA AVIACIÓN COMERCIAL	12
2.1.1	LOS INICIOS DE LA AVIACIÓN	12
2.1.2	LA AVIACIÓN COMERCIAL	15
2.1.3	LOS PRIMEROS REACTORES	17
2.1.4	LA ENTRADA EN ESCENA DE LA TURBINA	19
2.1.5	REACTORES PRIVADOS	23
2.1.6	LAS PRIMERAS AEROLÍNEAS DE BAJO COSTE	23
2.1.7	CARGUEROS DE GRAN TAMAÑO	25
2.2	EL AVIÓN	25
2.2.1	DEFINICIÓN	25
2.2.2	PRINCIPIOS DE VUELO	27
2.2.3	SUSTENTACIÓN	27
2.2.4	ESTRUCTURA DEL AVIÓN	30
2.2.4.1	Fuselaje.....	31
2.2.4.2	Alas.....	31
2.2.4.3	Empenaje de cola.....	33
2.2.4.4	Tren de aterrizaje.....	38
2.2.5	CONTROLES DE VUELO.....	38
2.2.6	PROPULSIÓN	41
2.2.7	AEROPLANOS. TIPOS Y USOS	41
Capítulo 3.	MATERIALES COMPUESTOS EN LA FABRICACIÓN DEL FUSELAJE	44
3.1	MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS.....	45
3.2	FIBRA DE CARBONO	47
3.3	MATERIALES SEMIELABORADOS	52



3.4	PREIMPREGNADOS	52
3.5	CARACTERÍSTICAS Y CLASIFICACIÓN.	53
3.6	ESTRUCTURAS SÁNDWICH	54
Capítulo 4.	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	57
4.1	FABRICACIÓN DE LOS CAJONES LATERALES.....	60
4.2	TOMA DE DATOS.....	64
Capítulo 5.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	71
5.1.	MÉTODOS ESTADÍSTICOS.....	72
5.1.1.	ANÁLISIS DE LA VARIANZA (ANOVA)	72
5.1.1.1	ANÁLISIS DE LA VARIANZA DE UN FACTOR	73
5.1.1.2	MODELOS MULTIFACTORIALES	74
5.1.2.	CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS	74
5.1.1.2	GRÁFICOS DE CONTROL CON MEMORIA	76
5.2.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	77
5.2.1.	ANOVA UNIFACTORIAL	77
5.2.2.	ANOVA MULTIFACTORIAL.....	81
5.2.3	ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DEL PROCESO	84
Capítulo 6.	CONCLUSIONES.....	99
Capítulo 7.	BIBLIOGRAFÍA	104



Capítulo 1. **INTRODUCCIÓN**

El objetivo del presente proyecto es analizar mediante métodos estadísticos la defectología existente en la unión de componentes aeronáuticos y poder dar una solución que pueda paliar o mejorar el problema, el problema estudiado se encuentra en la cola del avión, concretamente en el estabilizador horizontal, la siguiente figura muestra dicha zona.



Figura 1 Estabilizador horizontal en un Airbus A350

Empezaremos con el Capítulo 2 adentrándonos en el fascinante mundo de la aviación, desde sus inicios hasta la era moderna con los grandes aviones de las compañías comerciales. Después explicaremos que es un avión, sus principios de funcionamiento y sus partes fundamentales, entrando más a fondo en el conocimiento del empenaje de cola y más concretamente en el estabilizador horizontal ya que es ahí donde se localiza nuestro problema.

En el Capítulo 3 veremos que son los materiales compuestos y su aplicación en el mundo aeronáutico.



El Capítulo 4 nos permitirá estudiar cuál es el problema, donde se localiza y el porque de su estudio.

En el Capítulo 5 introduciremos primeramente los métodos estadísticos empleados tales como ANOVA y los gráficos de control, para posteriormente y tras explicar la toma de datos, utilizar estos para realizar un exhaustivo análisis de la varianza de las medias de las holguras obtenidas y finalmente analizar la estabilidad de las observaciones mediante gráficos de control.

Finalmente y para concluir en el Capítulo 6 haremos un resumen de las conclusiones obtenidas en base al análisis estadístico proponiendo un gráfico de control para la mejora del proceso productivo, además de explicar cuales han sido las mejoras o logros conseguidos durante la realización de este proyecto.



Capítulo 2. **EL MUNDO DE LA AVIACIÓN.**

2.1. HISTORIA DE LA AVIACIÓN COMERCIAL

2.1.1 LOS INICIOS DE LA AVIACIÓN

El hombre siempre ha anhelado volar; desde los tiempos prehistóricos observaba las aves y deseaba imitarlas. La historia de Dédalo e Ícaro, de la mitología griega, no es sino la expresión de ese deseo. En el siglo n de nuestra Era, Herón el Viejo, matemático de Alejandría, descubrió, según algunos de sus comentaristas, el principio básico de la propulsión de chorro que 1.800 años después se vino a usar como medio de impulsión de los aviones más veloces.

Ciertos sabios antiguos creían que para volar sería necesario imitar el movimiento de las alas de los pájaros o el empleo de un medio como el humo u otro más ligero que el aire. Hacia el siglo V de nuestra era se diseñó el primer aparato volador: la cometa o papalote. En el siglo XIII el monje inglés Roger Bacon, tras años de estudio, llegó a la conclusión de que el aire podría soportar un ingenio de la misma manera que el agua soporta un barco. A comienzos del siglo XVI Leonardo da Vinci analizó el vuelo de los pájaros y anticipó varios diseños que después resultaron realizables. Entre sus importantes contribuciones al desarrollo de la aviación se encuentra el tornillo aéreo o hélice y el paracaídas. Concibió tres tipos diferentes de ingenios más pesados que el aire: el ornitóptero, máquina con alas como las de un pájaro que se podían mover mecánicamente; el helicóptero diseñado para elevarse mediante el giro de un rotor situado en el eje vertical, y el planeador en el que el piloto se sujetaba a una estructura rígida a la que iban fijadas las alas diseñadas a imagen de las grandes aves. Sin embargo, nunca llegó a construir tales máquinas, pero sus diseños se conservaron.

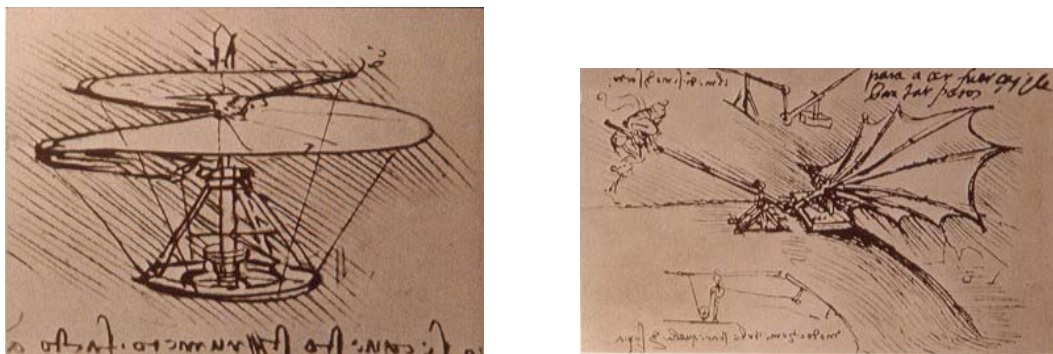


Figura 2.1 Diseños de Da Vinci para máquinas voladoras (www.profesorenlinea.cl)

Se hicieron numerosos esfuerzos para imitar el vuelo de las aves con experimentos basados en paletas o alas movidas por los músculos humanos, pero nadie lo logró.

Entre 1890 y 1901 se realizaron numerosos experimentos con prototipos provistos de motor. El más importante fue el de Langley, un aeroplano a un cuarto de escala de su tamaño real, que probó e hizo volar sin piloto en 1901 y 1903. Le llamó Aerodrome y fue la primera aeronave más pesada que el aire provista de un motor de gasolina que consiguió volar.

Los logros conseguidos a lo largo del siglo XIX aportaron los fundamentos necesarios para el éxito de los hermanos Wright, pero los mayores avances se debieron a los esfuerzos de Chanute, Lilienthal y Langley a partir de 1885. En 1903 aún no se habían conseguido la estabilidad y el control necesarios para un vuelo prolongado, pero los conocimientos aerodinámicos, y sobre todo el éxito de los motores de gasolina, que sustituyeron a los más pesados de vapor, permitirían que la aviación evolucionara con rapidez.

El día 17 de diciembre de 1903, cerca de Kitty Hawk, en el estado de Carolina del Norte, los hermanos estadounidenses Wilbur y Orville Wright realizaron el primer vuelo pilotado de una aeronave más pesada que el aire propulsada por motor. El avión fue diseñado, construido y pilotado por ambos hermanos, quienes realizaron dos vuelos cada uno. El más largo fue el de Wilbur con 260 m recorridos en 59 segundos. Al año siguiente continuaron mejorando el diseño del avión y su experiencia como pilotos a lo largo de 105 vuelos, algunos de más de 5 minutos. En 1905 llegaron a recorrer 38,9 km en 38 minutos y 3 segundos. Todos los vuelos se realizaron en campo abierto, regresando casi siempre cerca del punto de despegue. Hasta 1906 nadie más consiguió volar en un avión.

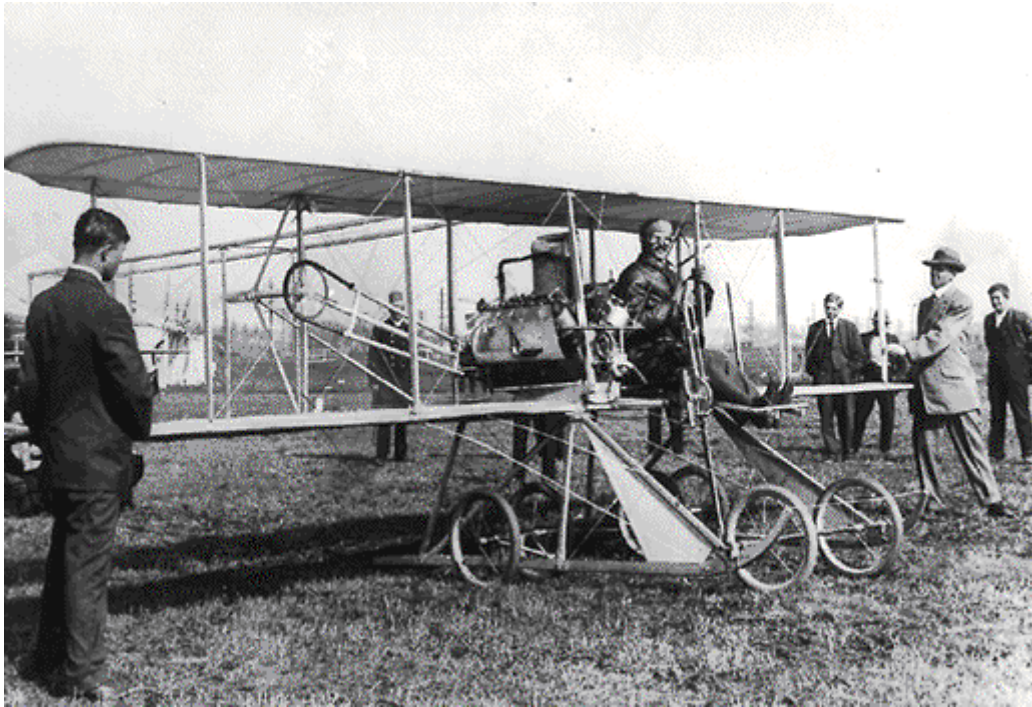


Figura 2.2 Avión Hermanos Wright (Air Voila)

El 13 de septiembre de 1906, Santos Dumont realizó un vuelo público en París, en su famoso avión, el 14-bis. Este aparato usaba el mismo sistema de alabeo empleado en las aeronaves de los hermanos Wright, y logró recorrer una distancia de 221 metros. El 14-bis, al contrario que el Flyer de los Wright, no necesitaba raíles, catapultas o viento para alzar el vuelo, y como tuvo mucha repercusión mediática en aquel momento, el vuelo es considerado por algunas personas como el primero realizado con éxito de un avión. Cuando se realizó este vuelo, poco o nada se sabía de los hermanos Wright, por lo que la prensa internacional consideró al 14-bis de Santos Dumont como el primer avión capaz de despegar por medios propios.

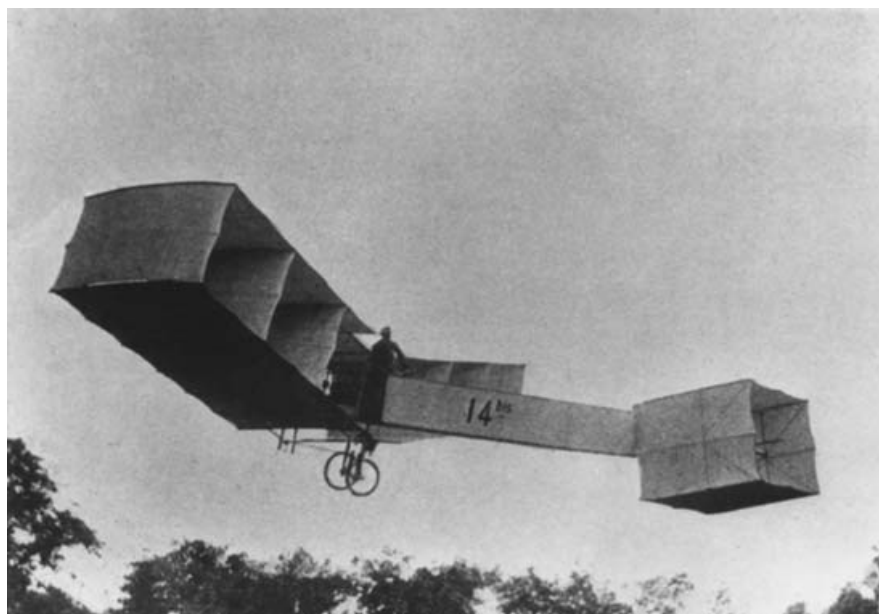


Figura 2.3 Avión Santos Dumont (www.profesorenlinea.cl)

El 3 de septiembre de 1908, Orville Wright hizo una demostración con un modelo más veloz para el Cuerpo de Señales del Ejército en Fort Meyer, Virginia. El 9 de septiembre completó el primer vuelo mundial de más de una hora y, también por primera vez, se transportó un pasajero, el teniente Frank P. Lamh, durante 6 minutos y 24 segundos.

2.1.2 LA AVIACIÓN COMERCIAL

Nada más despegar, el hombre se propuso como siguientes etapas atravesar el mundo y desarrollar el tráfico aéreo con fines lucrativos. Los pioneros de la década de 1920 habían entusiasmado al mundo con sus hazañas, pero la creación de un servicio de pasajeros seguro y fiable era algo muy diferente.

La primera línea aérea del mundo se creó en enero de 1914 entre las ciudades de St. Petersburg y Tampa, separadas por 32 km. El viaje con el hidroavión Benoist duraba sólo 20 minutos, muy poco en comparación con las dos horas que tardaba un coche. No obstante, los pequeños Benoist sólo podían llevar al piloto y a un pasajero. Aunque el negocio se fue a pique al cabo de cuatro meses, el experimento dejó entrever los potenciales beneficios de los viajes en avión, por bien que en aquellos momentos aún fueran imperceptibles.

El verdadero nacimiento de la aviación comercial tuvo lugar después de la Primera Guerra Mundial. En este período, la potencia de los motores de los aviones se llegó a triplicar.

Europa vivió un notable incremento de compañías que ofrecían vuelos comerciales, la mayoría de ellos a través del canal de la Mancha. La primera aerolínea, Aircraft Transport and Travel Ltd. Fue registrada en el Reino Unido por George Holt Thomas en octubre de 1916, e inauguró su primer servicio de pasajeros en Agosto de 1919. Los vuelos de Londres a París con la compañía de Thomas se convirtieron en la primera línea regular de la posguerra. Para realizar este servicio se empleó un antiguo avión militar, el de Havilland D.H.4A., con base en el aeródromo de Hounslow.

A la compañía de Thomas le siguieron muchas otras: en el Reino Unido, Handley Page Transport; en Francia, Compagnie des Messageries Aériennes y Compagnie des Grands Express Aériens. En Europa se produjo un hecho curioso, llegó a haber casi más aerolíneas que viajeros potenciales. Muchas de ellas quebraron, pero otras se fusionaron y formaron grandes compañías aéreas, como la británica Imperial Airways, la francesa Air France, la alemana Deutsche Luftansa, la neerlandesa KLM o la belga Sabena.

Terminada la Segunda Guerra Mundial, la industria aeronáutica civil experimentó cambios sustanciales: los motores a reacción aumentaron la eficacia de los nuevos aviones y redujeron a la mitad la duración de los vuelos. La era comenzó con el Constellation (500 km/h) y culminó con el Concorde (2.000 km/h)

La Segunda Guerra Mundial cambió la imagen de la aviación. Los miles de pilotos que sirvieron en las fuerzas aéreas durante el conflicto y los millones de personas que vieron pasar los aviones sobre sus cabezas contribuyeron a difuminar el miedo y las dudas existentes hasta entonces. La aplicación más fluida de la tecnología militar a la aviación civil se produjo en Estados Unidos. El conocimiento y la experiencia acumulados en la producción de bombarderos de gran radio de acción como el Boeing B-29, con su cabina presurizada y sus potentes motores, resultaron decisivos para su posterior aplicación comercial en la inmediata posguerra. En 1946, TWA recibió los primeros Lockheed Constellation y Boeing comenzó a desplegar su modelo 377 Stratocruiser, que era una versión renovada del B-29.

Los primeros años de la posguerra fueron la época dorada del avión civil con motor convencional de pistones. Pan Am y TWA inauguraron servicios transatlánticos con aviones Constellation en febrero de 1946 en el Reino Unido, por el contrario British Overseans Airways Corporation (BOAC) todavía empleaba hidroaviones para sus rutas con la Commonwealth, como el Bristol Type 170 Freighter, se reservaron para vuelos comerciales cortos (como la travesía del canal de la Mancha); las compañías más grandes, en cambio apostaron por lo americano y BOAC, por ejemplo, encargó el Constellation y el Stratocruiser. Las últimas versiones de éste primero y del nuevo Douglas DC-7 eran soberbias; no obstante, y aunque parezca mentira, representaron el principio del fin de los aviones civiles con motor de pistones, ya que los fabricantes y los pasajeros exigían cada vez más de los aviones, y el rendimiento de éstos ya no podía superarse con la tecnología existente.

2.1.3 LOS PRIMEROS REACTORES

Hacia el fin de la Segunda Guerra Mundial, los aviones alemanes y británicos habían demostrado las ventajas de la tecnología del motor a reacción, que los fabricantes de aviones comerciales no tardaron en incorporar. En este sentido De Havilland dio un gran salto al presentar el prototipo de reactor Comet el 27 de Julio de 1949. El 2 de Mayo de 1952, BOAC inauguró su servicio con el Comet entre Londres y Johannesburgo. Gracias a sus 725 km/h de velocidad se redujo a la mitad la duración del vuelo y la empresa obtuvo un beneficio neto desde el primer año de utilización. El desastre llegó en 1954 cuando tres Comet se estrellaron a causa de la fatiga del metal. De Havilland había demostrado que el futuro de la aviación civil pertenecía a los reactores, retando así ala competencia americana.

El 15 de Julio de 1954, Boeing estrenó el 707, fue el primer reactor civil estadounidense y se vendió en grandes cantidades por todo el mundo. Contando las versiones militares de construcción se construyeron 878 unidades de 707 y 154 de 720, una variable de 707 más corta y ligera.

LOS TURBOHÉLICES EUROPEOS

A finales de la década de los 40 apareció en Reino Unido una novedad mundial: Le Vickers Viscount, el primer avión turbohélice civil. La turbohélice funciona de un modo muy similar al motor a reacción salvo que en ella existe una turbina que mueve el eje de una hélice. Su ventaja es que tiene un mayor rendimiento que un motor convencional de pistones y menor consumo que un reactor a bajas velocidades.

En EEUU, no obstante, la impresión causada por los turbohélices civiles británicos no fue suficiente para que los fabricantes de ese país desafiaran a Vickers y Bristol.

LA ÉPOCA DORADA DEL REACTOR COMERCIAL

Mientras el desarrollo del motor a reacción avanzaba a ambos lados del Atlántico, los turborreactores mantenían su ventaja sobre los turbohélices. Caravelle fue presentado en 1952 y aceptado en Septiembre de ese mismo año. La disposición del motor en el fuselaje aportaba muchos beneficios, pero era muy extraña en aquellos tiempos, ya que lo habitual era montarlos en el ala. También se mejoró el rendimiento en el despegue y aterrizaje, pues la posición del motor suministraba una mayor potencia en las pistas cortas. También los pasajeros salieron ganando, ya que el ruido disminuyó considerablemente. Otra novedad era el sistema de aterrizaje automático.

COMPETENCIA TRANSATLÁNTICA.

Los tres grandes fabricantes estadounidenses (Boeing, Douglas y Lockheed) desarrollaron varias configuraciones de reactores de dos y tres motores a finales de la década de 1950 y principios de la de 1960. Por el contra, el primer reactor civil de Douglas fue un cuatrimotor. El éxito del 727 estimuló al desarrollo de bimotores civiles.

DEL BABY AL JUMBO

A partir de este momento, Boeing volvió a montar los motores en las alas. Conocido como «Baby Boeing», el modelo de corto alcance 737 realizó su primer vuelo el 9 de abril de 1967. La versión original entró en servicio con Lufthansa en febrero de 1968, mientras que una versión «alargada» de 150 plazas apareció seis meses más tarde. Gracias a su poco peso y, por consiguiente, a su bajo consumo de combustible (sólo 0,034 litros por asiento y kilómetro), el 737 fue todo un éxito.

El primer reactor del mundo de fuselaje ancho, el Boeing 747 «Jumbo», conservaba la convencional disposición de los motores bajo las alas. Los orígenes de este aparato se remontan a unos estudios preliminares para construir un avión militar de transporte. El 9 de febrero de 1969 fue presentado oficialmente al público en el Salón Aeronáutico de París.

TRIRREACTORES ESTADOUNIDENSES

Para competir con el Boeing 747, Douglas y Lockheed empezaron a producir sus primeros aviones de fuselaje ancho. El Douglas DC-10 y el Lockheed L-1011 Tristar se desarrollaron a partir de un encargo de American Airlines, que deseaba tener un bimotor de este tipo. No obstante, los dos fabricantes convencieron a la aerolínea para que considerara un trirreactor de mayor capacidad. El DC-10 realizó su primer vuelo en agosto de 1970, tres meses antes que el Tristar. Las principales compañías estadounidenses dudaron entre ambos, pero el poco tiempo que transcurrió desde el inicio del programa del DC-10 hasta su primer vuelo hizo tomar la decisión. El primer servicio de American Airlines con DC-10 se inauguró en agosto de 1971.

2.1.4 LA ENTRADA EN ESCENA DE LA TURBINA

La aparición de aviones cada vez más modernos vino acompañada por la de grupos motores cada vez más eficiente. Así, hoy en día, los aviones civiles cuentan con un sistema propulsor derivado del motor a reacción: la turbina. El rendimiento de la turbina a velocidades intermedias es tan eficaz como lo son el turborreactor y la turbohélice a altas y bajas velocidades, respectivamente. Gracias a este doble sistema de propulsión, los aviones con turbinas aprovechan mejor el combustible que los turborreactores y pueden alcanzar velocidades de entre 400 y 1.045 km/h.

DEL 757 AL 777.

A finales de la década de 1970. Boeing continuó ampliando su gama de aviones civiles sacando al mercado aparatos configurados de la forma tradicional, es decir, con los motores bajo las alas. En abril de 1978, United Airlines efectuó un encargo a Boeing que supondría la aparición de un nuevo modelo: el Boeing 767. Este avión con capacidad para 350 pasajeros y del que se construyeron seis variantes, con un total de 851 unidades, realizó su primer vuelo con United Airlines el 8 de septiembre de 1982.

Le siguió en 1983 el Boeing 757, de dimensiones más reducidas (289 plazas). Este reactor de medio alcance presenta los costes de explotación más bajos de entre todos los aviones comerciales de su clase.

El último avión de pasajeros lanzado por Boeing es el 777, un modelo de largo radio de alcance con el que se propone rellenar el vacío existente entre el 747 y el 767. El primer servicio con un 777, fue efectuado por United Airlines entre Londres y Washington el 7 de junio de 1995.

EUROPA RECUPERA TERRENO

Los principales competidores del Boeing 777 son los Airbus A330 y A340. Airbus es un conglomerado de fabricantes europeos constituido por Aérospatiale, Deutsche Airbus, CASA y British Aerospace. El primer Airbus fue el A300 (361 plazas), que llevó a cabo su vuelo inaugural el 28 de octubre de 1972. Durante los siguientes treinta años, Airbus se ha hecho con un importante segmento en el mercado de los aviones comerciales de corto y medio alcance, con más de 2.000 aparatos de esta clase vendidos en todo el mundo. Con una tecnología avanzada, el Airbus A320 fue el primer avión comercial de pasajeros en emplear el sistema de pilotaje electrónico, en el que no existe ninguna conexión directa entre los controles de la cabina de mando y los deflectores y el timón del aeroplano. En su lugar, las instrucciones del piloto se transmiten a un sistema de control que convierte la señal en acción. El sistema de pilotaje electrónico puede anular una orden del piloto que considere peligrosa. Pese a las ventajas, hoy se debate sobre si con ello el piloto ha perdido en exceso el control del aparato, tan necesario, por ejemplo, para evitar una colisión en el aire.

Tras haber vendido hasta el año 2002 alrededor de 2.500 aviones, el mayor logro de Airbus ha sido diseñar aviones capaces de competir con la élite de los fabricantes estadounidenses. El A330 y el A340 fueron lanzados al mismo tiempo, el 5 de junio 1987. El A340 realizó vuelos de prueba a finales de 1991 y principios de 1992 antes de que entraran en servicio con Lufthansa en enero de 1993 las variantes A340-200 y A340-300. El A330 experimentó con los motores General Electric y Rolls-Royce desde noviembre de 1992 antes de entrar en servicio con Air Inter, en enero de 1994. En los primeros años del siglo XXI, Airbus ha logrado que Boeing deba replantearse su política de diseños.

LA RUPTURA DE LA BARRERA DEL SONIDO

Los primeros experimentos serios con los vuelos supersónicos se remontan a 1943, año en que el gobierno británico emitió la disposición E.24/43 para producir un «avión transónico» capaz de alcanzar una velocidad 1,5 veces superior a la del sonido (Mach 1.5), unos 1.060 km/h en altitud. En febrero, cuando el avión (el Miles M.52) estaba casi terminado, el programa fue cancelado. El primero en romper la barrera del sonido en vuelo horizontal fue el estadounidense Chuck Yeager, quien el 14 de octubre de 1947 alcanzó la velocidad Mach 1.06 con el Bell X-1. En febrero de 1948, el Douglas D-558-2 Skyrocket logró el Mach 2. El primer vuelo supersónico de un aparato británico se produjo el 6 de septiembre de 1948, día en que John Derry alcanzó los 1.127 km/h en un picado entre los 12.200 y los 9.000 m con un avión de alas en flecha de Havilland D.H.108 Swallow.

El concepto de avión supersónico civil (SST) surgió hacia la década de 1950. Pese a perder la supremacía en los vuelos supersónicos en favor de Estados Unidos, el Reino Unido continuó liderando la investigación y en 1956 creó el Comité Consultor para el Transporte Supersónico (STAC). Con relación al diseño de un avión supersónico, una de las primeras decisiones en tomarse fue la relativa a la forma de las alas, que debían proporcionar un rendimiento aerodinámico a cualquier velocidad y altitud. Para la velocidad perseguida (Mach 2), el mejor diseño del ala era el de una flecha muy pronunciada; no obstante, para el control a altitudes bajas se requería un borde de salida recto. El ala en delta era la solución natural. La decisión de emplear alas en delta fue tomada de forma independiente por investigadores franceses, soviéticos y estadounidenses. Tres de los principales impulsores del STAC (Bristol, English Electric y Vickers) se fusionaron en 1960 en la British Aircraft Corporation (BAC). Se instó a todos los fabricantes a presentar diseños. El elegido fue el 223 de BAC, aunque una condición impuesta por BAC fue que se autorizaran las consultas con ingenieros y fabricantes extranjeros. Estados Unidos decidió investigar por su cuenta, Alemania no estaba interesada y Francia ya tenía un proyecto en marcha. A principios de 1961 se presentaron los diseños del BAC 223 (125 plazas) y del Super Caravelle de Sud-Aviation (70-80 plazas). Los dos modelos eran muy parecidos en todos los aspectos. En junio de 1961, BAC y Sud-Aviation iniciaron conversaciones con vistas a una posible

colaboración. El acuerdo formal tuvo lugar el 29 de noviembre de 1962 y condujo en último término a la fabricación del Concorde.

Empezó desde aquel instante una carrera por los cielos, y con un competidor inesperado. En el Salón Aeronáutico de París (1965), la URSS presentó su propio modelo supersónico, el Tupolev Tu-144. Por su parecido con el proyecto francobritánico, el Tu-144 fue apodado «Concordski».

En Estados Unidos, también estaba en marcha un proyecto de estas características. Según la Administración Federal de Aviación, el programa conllevaría la producción de más de 500 aviones. Boeing y Lockheed presentaron respectivamente el 733 y el L-2000 en diciembre de 1966. Aunque el L-2000 era más fácil de construir, también era más lento y ruidoso que el Boeing. Por tanto, el 1 de mayo de 1967, Boeing recibió el encargo de dos unidades del 733, denominado ya 2707. La solución estadounidense al problema de las alas fue un diseño de geometría variable, en el que un ala de formas convencionales podía retirarse hacia atrás para producir un ala en delta a altas velocidades. A pesar de todo, problemas derivados de la ambiciosa velocidad deseada (Mach 3), tales como el ablandamiento de las superficies de aluminio o la contaminación acústica causada por los aviones supersónicos, indujeron al Senado a cancelar el programa en 1971. Desde ese momento, Europa pasó a tener el mando en el desarrollo de los aviones supersónicos.

El primer prototipo francobritánico, el Concorde 001, se presentó en las instalaciones de Aérospatiale de Toulouse, el 11 de diciembre de 1967. Tras la confusión inicial debida al nombre (Concord, según BAC; Concorde, según Aérospatiale), se eligió «Concorde» como denominación oficial. El primer vuelo tuvo lugar el 2 de marzo de 1969, nueve semanas más tarde que el Tu-144. Concorde alcanzó Mach 1 el 1 de octubre de 1969 y Mach 2 el 4 de noviembre de 1970. Su velocidad máxima fue Mach 2.05 (2.179 km/h) a 17.500 m de altitud.

En la década de 1990, la NASA modificó un Tu-144 con el fin de usarlo como banco de pruebas de una segunda generación de aviones supersónicos que debían construirse en el marco del Programa de Investigación Comercial de Alta Velocidad. El proyecto fue cancelado en 1999 y el Tupolev vendido.

Tras un espectacular accidente en Francia, en julio de 2000, todos los Concorde fueron retirados para incorporarles nuevas medidas de seguridad. Los vuelos se reanudaron en noviembre de 2001; sin embargo, el 10 de abril de 2003 se anunció su retiro definitivo, fechado en octubre de aquel mismo año. Air France dejó de prestar servicio con el Concorde el 31 de mayo.

2.1.5 REACTORES PRIVADOS

No todos los vuelos civiles son efectuados por aviones supersónicos de grandes aerolíneas; una cuota importante del mercado la ocupan los reactores privados de 8-10 plazas. Después del 11 de septiembre de 2001, la pérdida de confianza en la seguridad aérea hizo que la venta de reactores privados se disparara. Desde entonces, la demanda ha caído de forma espectacular.

2.1.6 LAS PRIMERAS AEROLÍNEAS DE BAJO COSTE

En 1971, Rollin King y Herb Kelleher establecieron vuelos entre Dallas, Houston y San Antonio con la compañía Southwest Airlines, la primera aerolínea de bajo coste estadounidense. La estrategia era simple: atraer a la clientela con un servicio barato y fiable. En 1973, Southwest ya presentaba beneficios; cuatro años más tarde, ya cotizaba en la bolsa de Nueva York. En 1990, la compañía valía 1.000 millones de dólares; diez años más tarde, era la quinta mayor aerolínea de Estados Unidos.

En Europa, las fortunas de Laker, King y Kelleher dieron alas a la creación de compañías de bajo coste. En 1985, Ryanair inauguró un servicio con aviones turbohélice entre Waterford (Irlanda) y Londres Gatwick. Un año más tarde, Ryanair adquirió London European Airways e inauguró la ruta Dublín-Londres. Las grandes aerolíneas empezaron a tomar nota. Por entonces, British Airways y Air Lingus pedían 209 libras por un vuelo entre ambas ciudades, mientras Ryanair lo ofrecía por sólo 95. No obstante, esta última compañía, víctima de su ambición, entró en crisis a finales de la década de 1980. Para afrontarla, decidió convertirse en una compañía de bajo coste al estilo de Southwest y estandarizó su flota para operar sólo con Boeing 737. Ryanair también ofreció sus aviones como espacio publicitario al servicio de empresas como Jaguar y Kilkeny o periódicos como News of the World. El éxito de esta reorganización fue tal, que en enero de 2002 el jefe ejecutivo Michael O'Leary efectuó

un encargo de 100 ejemplares Boeing 737-800, el mayor pedido de estas características. O'Leary arrendó algunas de estas unidades a otras aerolíneas y recuperó parte del dinero.

En enero de 2003, Ryanair compró Buzz, otra aerolínea de bajo coste, y eliminó sus rutas improductivas. Pese a las quejas de mal servicio y del mal estado de los aviones, Ryanair está considerada la segunda mejor compañía aérea de Europa, sólo por detrás de Lufthansa.

Otra aerolínea que ha querido «apuntarse» al bajo coste es Easyjet. La introducción de tales servicios se debe en gran parte a los cambios en la legislación europea, así como a los pioneros en este campo de las décadas de 1960 y 1970. En 1987, la Unión Europea inició una política de «cielos abiertos» y liberalizó el tráfico aéreo. Con anterioridad, las rutas, las tarifas y la capacidad se decidían en acuerdos intergubernamentales; desde 1987, cualquier aerolínea con un Certificado de Operador Aéreo puede fijar rutas propias, establecer precios a su antojo y transportar tantos pasajeros como desee. Easyjet esperaba con ansia esta liberalización. Su fundador, Stelios Haji-Ioannou, quien empezó con sólo dos Boeing 737 y definió la compañía como una «aerolínea virtual», contrató pilotos y personal desde sus primeros vuelos en 1995. La primera aerolínea completamente de propiedad no fue adquirida hasta abril de 1996. La empresa también causó sensación en todo el Reino Unido por sus impactantes documentales *Airline*. Casi nueve millones de telespectadores siguieron la quinta serie, emitida en la primavera de 2001.

No obstante, ¿por qué King, Kelleher, O'Leary y Haji-Ioannou han tenido éxito donde Freddie Laker fracasó? Uno de los factores más importantes para las compañías europeas de bajo coste fue la liberalización del tráfico aéreo en 1987, que abrió literalmente el cielo a todo aquel que tuviera dinero e iniciativa para crear una aerolínea. En segundo lugar, y de una manera más global, Internet ha revolucionado el modo en que la gente prepara los viajes. La World Wide Web permite que la gente compare precios entre compañías antes de reservar sus billetes online sin tener que recurrir a una agencia de viajes. Southwest fue la primera de estas aerolíneas en abrir una página en Internet. Estos dos factores le han dado a las nuevas compañías más oportunidades que las que tuvo Freddie Laker en la década de 1970 y principios de la de 1980.

2.1.7 CARGUEROS DE GRAN TAMAÑO

Los componentes de un Airbus se construyen en diferentes lugares de Europa antes del ensamblaje final en Toulouse o Hamburgo. En sus inicios, Airbus transportaba los componentes por carretera, lo que demostró ser lento y poco práctico. Más tarde se adaptaron como Boeing Stratocruiser con fuselajes más largos para alojar las grandes alas del avión. Los costes de operación de estos anticuados aviones Guppy se consideraron demasiado altos, de ahí que en octubre de 1991 Aerospatiale y Deutsche Aerospace AG (DASA) formaran la Special Air Transport Internacional Company (SATIC) para construir un aparato capaz de transportar los componentes más grandes de los aviones en construcción. En Septiembre de 1994 hizo su vuelo inaugural el Airbus A300-600ST Beluga, cuyo primer ejemplar fue entregado a Airbus un año más tarde. Aviones como el Boeing 747, el Lockheed C-5 Galaxy y el Antonov An-124 pueden llevar cargas más pesadas, pero ninguno de ellos alcanza el volumen del Beluga (37,7 m de largo por 7,4 m de diámetro)

2.2 EL AVIÓN

2.2.1 DEFINICIÓN

Avión también denominado aeroplano es una aeronave más pesada que el aire, por lo general propulsada por medios mecánicos y sustentada por alas fijas como consecuencia de la acción dinámica de la corriente de aire que incide sobre su superficie.

Otras aeronaves más pesadas que el aire son:

- Planeador o velero, provisto también de alas fijas y carentes de motor.
- Aquéllas aeronaves en las que se sustituyen las alas por un rotor que gira en el eje vertical, como por ejemplo el autogiro, el helicóptero,...
- Ornitóptero, cuyo empuje y sustentación se consigue mediante alas batientes.

La palabra “avión o aeroplano” nos sugiere normalmente aparatos que operan desde tierra firme, pero en realidad se emplea para catalogar otros tipos de aviones, cuya diferencia entre ellos está en el tren de aterrizaje; entre estos aparatos cabe destacar los siguientes:

- Aviones transportados. Están diseñados para despegar y aterrizar desde una instalación móvil, la más común es el portaaviones; para ello disponen de un gancho con el que en el momento de aterrizar se sujetan a un cable que cruza la cubierta del portaaviones y, junto con los frenos del propio avión, permiten una carrera de aterrizaje muy corta. Para despegar se enganchan a una catapulta que en pocos segundos, junto con el motor a máxima potencia, les hacen alcanzar la velocidad de despegue.
- Hidroaviones. Estos aviones sustituyen las ruedas del tren de aterrizaje por flotadores. El modelo conocido como barca voladora tiene el fuselaje como el casco de un barco y, aparte de sus funciones aerodinámicas e hidrodinámicas, sirve para que flote una vez posado en el agua. Los anfibios van provistos de ruedas y flotadores y en algunos casos de casco, lo que permite operar con la misma efectividad tanto en tierra como en agua. Estos aviones fueron utilizados antes de la II Guerra Mundial para el servicio comercial intercontinental y para el transporte militar.
- Anfibios. Vuelan y aterrizan aún más despacio por su doble tren de aterrizaje y se usan menos. A veces son muy útiles, sobre todo en zonas como la selva, donde la construcción de una pista de aterrizaje es costosa y difícil de mantener, pero, sin embargo, hay abundantes ríos con aguas profundas y tranquilas. Existen flotadores anfibios para avionetas. Parecen flotadores convencionales y tienen una rueda en el centro. La rueda sobresale muy poco y no crea resistencia en el agua, pero asoma lo suficiente para permitir aterrizar en superficies de tierra o de hierba cortada
- Aeronave VTOL¹. Las características de vuelo de este avión son semejantes al vuelo de cualquier avión, adicionalmente tienen la capacidad de despegar y aterrizar en vertical. Hay varias maneras de conseguir el despegue vertical desde tierra; la mayor parte de los diseños utilizan motores reactores giratorios que al comienzo del despegue se colocan en posición vertical, y después, poco a poco, van rotando hasta situarse horizontalmente al adquirir la velocidad necesaria para volar; este sistema requiere mucha potencia de empuje en los motores. Las alas variables y los ventiladores móviles se usan también en este tipo de despegues, pero originan resistencias aerodinámicas muy altas para el vuelo horizontal.

¹ *Vertical takeoff and landing*, ‘despegue y aterrizaje verticales’

- La aeronave STOL². Es un aeroplano que despegue y aterriza en pistas muy cortas por la poca distancia que necesita para ello. Las capacidades para un despegue y aterrizaje cortos se caracterizan por un vuelo lento, el peso del aparato y la potencia disponible. Los aviones con mayor empuje por peso serán capaces de tomar tierra a velocidades más bajas, dejando menos inercia que disipar durante el aterrizaje. Cuanto más ligero es un avión, más fácil es frenarlo y cuanto más potente es, más fácil será decelerarlo a su mínima velocidad de vuelo.

2.2.2 PRINCIPIOS DE VUELO

Un aeroplano se sustenta en el aire como consecuencia de la diferencia de presión que se origina al incidir la corriente de aire en una superficie aerodinámica como es el ala. En la parte superior la presión es menor que en la inferior y esa diferencia produce un efecto de empuje hacia arriba llamado sustentación. La magnitud del empuje depende de la forma del corte transversal del ala, de su área, de las características de su superficie, de su inclinación respecto al flujo del aire y de la velocidad del mismo.

2.2.3 SUSTENTACIÓN

La sustentación producida en un ala o superficie aerodinámica es directamente proporcional al área total expuesta al flujo de aire y al cuadrado de la velocidad con que ese flujo incide en el ala. También es proporcional, para valores medios, a la inclinación del ángulo de ataque del eje de la superficie de sustentación respecto al de la corriente de aire.

1. RESISTENCIA

Los mismos factores que contribuyen al vuelo producen efectos no deseables, como la resistencia, la fuerza que tiende a retardar el movimiento del avión en el aire.

Encontramos dos tipos de resistencia que influyen en el vuelo del avión:

- Resistencia aerodinámica. Esta resistencia es producida por la fricción que se opone a que los objetos se muevan en el aire. Depende de la forma del objeto y de la rugosidad de su superficie. Se puede reducir mediante perfiles muy aerodinámicos del

² *Short takeoff and landing*, ‘despegue y aterrizaje cortos’

fuselaje y alas del avión. Hay diseños que incorporan elementos para reducir la fricción, consiguiendo que el aire que fluye en contacto con las alas mantenga el llamado flujo laminar cuando se desliza sobre ellas sin producir torbellinos.

- Resistencia inducida: es el resultado directo de la sustentación producida por las alas. Se manifiesta en forma de torbellinos o vórtices en la parte posterior de los *slats* y especialmente del extremo de las alas, y en algunos aviones se coloca una aleta pequeña denominada *winglet*, que reduce notablemente su efecto.

Se llama **resistencia total** a la suma de ambas resistencias. La ingeniería aeronáutica trata de conseguir que la relación entre la sustentación y la resistencia total sea lo más alta posible, lo que se obtiene teóricamente al igualar la resistencia aerodinámica con la inducida, pero dicha relación en la práctica está limitada por factores como la velocidad y el peso admisible de la célula del avión. En el avión de transporte subsónico su valor puede llegar a veinte; en los de altas características se duplica ese valor, mientras que el incremento de la resistencia, cuando se vuela a velocidades supersónicas, lo reduce a menos de diez.

2. VUELO SUPERSÓNICO

La época de la aviación supersónica empezó después de la II Guerra Mundial y el desarrollo de la misma llevó a tener que resolver problemas aerodinámicos y técnicos que hicieron los vuelos de experimentación tan difíciles e inseguros como los vuelos de los primeros aviadores. Ni los complejos análisis matemáticos ni los resultados obtenidos en el túnel aerodinámico, donde se experimentaban los prototipos, podían garantizar que las características de un avión en vuelo supersónico fuesen, no ya satisfactorias, sino seguras sin más.

1. La barrera del sonido

El primer gran problema que encontraron los ingenieros en el vuelo supersónico fue la barrera del sonido. Esta se alcanza cuando la aeronave llega a la velocidad del sonido en el aire, conocida como Mach 1 (unos 1.220 km/h al nivel del mar). Al obtener esa velocidad, se produce la onda de choque, es una modificación brusca en la compresibilidad del aire. Cuando un avión se mueve a velocidad subsónica, las variaciones de presión que se producen en el aire (el ruido) viajan más rápido que él y

se dispersan con facilidad. Si el avión viaja más deprisa que la velocidad del sonido, las variaciones de presión no se pueden dispersar, por lo que permanecen en la parte delantera del avión en forma de cono. El sonido asociado a estas ondas de choque se proyecta en tierra como una bomba sónica. El resultado de esta distorsión incrementa la resistencia al avance del avión que afecta a la sustentación del ala y a los mandos de vuelo.

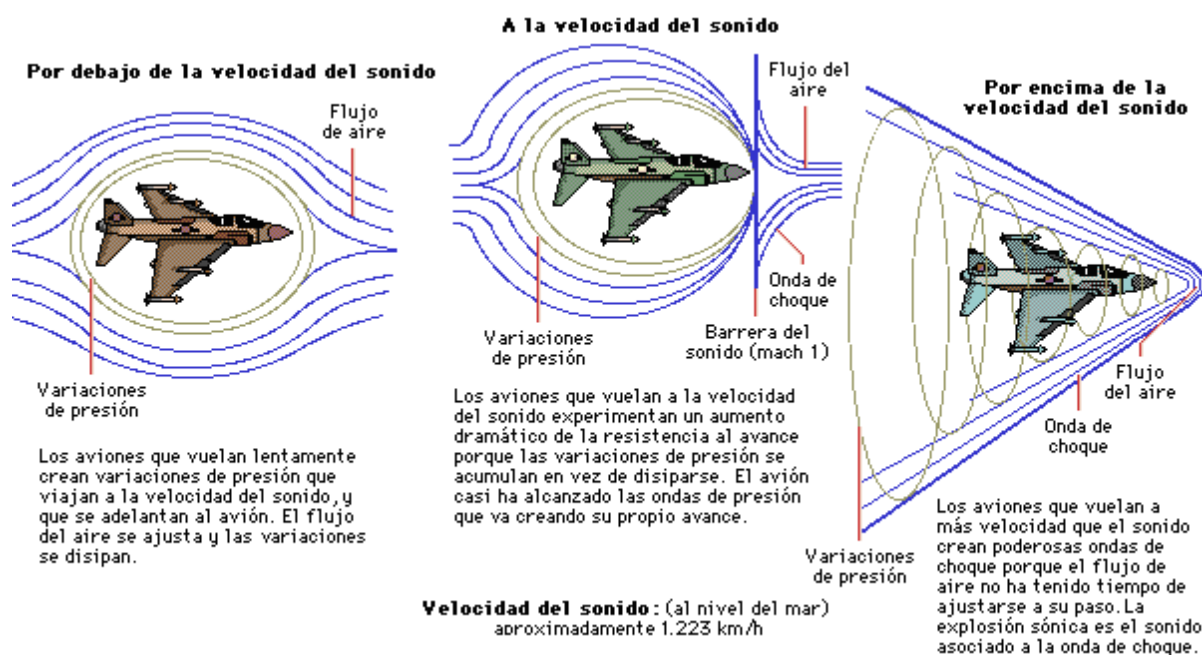


Figura 2.4 Esquema de la variación de presión. Velocidad del sonido (Enciclopedia Encarta 2009)

2. Contaminación acústica

En el vuelo supersónico el ruido es una gran dificultad asociada a los aviones. El ruido de los aviones supersónicos genera grandes problemas a los trabajadores y vecinos próximos a los aeropuertos ya que el ruido de los motores es alto y agudo más que el de los aviones subsónicos. Su mayor nivel de ruido se produce cuando tiene lugar el estampido sónico, es decir, cuando la onda de choque originada por un vuelo supersónico impacta el suelo, genera un fragor en forma de explosión, pudiendo ocasionar roturas de los cristales de las ventanas de las casas en zonas muy alejadas del avión que lo ha causado. Los investigadores y los fabricantes intentan reducir tanto el ruido de los motores como el estampido sónico, entre otras cosas porque les obligan las regulaciones de las autoridades aeronáuticas, que van desde prohibir el vuelo de aviones supersónicos sobre áreas pobladas, hasta establecer procedimientos, horarios y

trayectorias especiales de despegue y aterrizaje, con el fin de reducir el impacto acústico de cualquier tipo de avión que opera en los aeropuertos.

2. La barrera del calor

Otro problema asociado al vuelo supersónico es la alta temperatura que se produce por la fricción del aire con las superficies exteriores del aeroplano. Este problema se conoce con el nombre de barrera del calor. Los materiales utilizados para construir la estructura y la superficie deben ser más resistentes al calor y a la presión que los utilizados en los aviones subsónicos, estos materiales se utilizan para contrarrestar las altas temperaturas y presiones que origina la velocidad supersónica, El titanio es un ejemplo de material con gran eficiencia ante ambos efectos.

2.2.4 ESTRUCTURA DEL AVIÓN

Cuando hablamos de la estructura de un avión actual y convencional tenemos que destacar cuatro componentes básicos: fuselaje, alas, empenaje de cola y tren de aterrizaje. En la figura 2.5 podemos ver las partes de un avión:

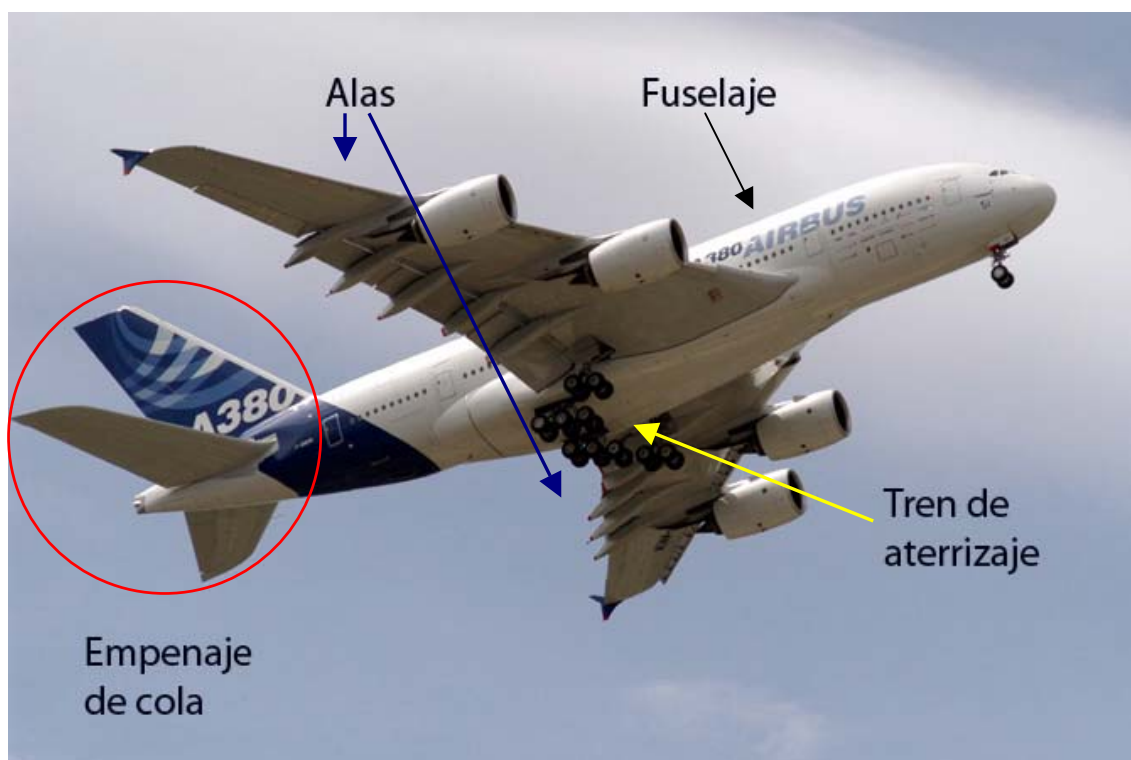


Figura 2.5 Representación de las partes de un avión

A continuación detallaremos cada uno de ellos.

2.2.4.1 Fuselaje

Del francés "fuselé" que significa "ahusado". En los inicios de la aviación, el fuselaje consistía en una estructura abierta que soportaba el resto de componentes del avión. La parte inferior de la estructura servía de tren de aterrizaje. Después, la necesidad de aumentar la resistencia y mejorar las prestaciones llevó a desarrollar fuselajes cerrados, afianzados y sujetos por medio de montantes y cables de riostramiento, que mejoraban las condiciones aerodinámicas, proporcionaban protección a los pilotos y pasajeros y conseguían mayor espacio para el equipaje y la carga. Poco tiempo después aparecieron los fuselajes monocasco (es el modelo más usado actualmente, permitiendo presurizar el interior, para volar a elevadas altitudes), una novedad que consistía en integrar en un solo cuerpo la estructura y su recubrimiento. Hoy por hoy si buscamos una definición de fuselaje hablamos de el cuerpo principal de la estructura del avión, cuya función principal es la de dar cabida a la tripulación, a los pasajeros y a la carga, además de servir de soporte principal al resto de los componentes. El diseño del fuselaje además de atender a estas funciones, debe proporcionar un rendimiento aceptable al propósito a que se destine el avión. Los fuselajes que ofrecen una menor resistencia aerodinámica son los de sección circular, elíptica u oval, y de forma alargada y ahusada.

2.2.4.2 Alas

Pocos años después del vuelo de los hermanos estadounidenses Wilbur y Orville Wright, aparecieron los aviones de un sólo plano o ala, conocidos como monoplanos. Los primeros aeroplanos que se construían preferentemente eran de dos alas (biplano) y en ocasiones con tres o con cuatro. Las alas múltiples tienen la ventaja de aumentar la sustentación con una estructura más fuerte, pero el monoplano encuentra menor resistencia al avance. Cuando se desarrolló el ala cantilever, el monoplano se afianzó definitivamente a pesar de que no comenzó su diseño hasta la década de los treinta. El ala cantilever consigue su fijación mediante elementos estructurales internos. Es un ala limpia desde su encastre en el fuselaje hasta su extremo, sin soporte visible alguno y se usa en la mayor parte de los aviones. La estructura de un ala consiste en un armazón de largueros y costillas características cubierto por planchas metálicas unidas y sujetas al mismo por remaches u otros medios.

El ala es una superficie aerodinámica que le brinda sustentación al avión debido al efecto aerodinámico, provocado por la curvatura de la parte superior del ala (extradós) que hace que el aire que fluye por encima de esta se acelere y por lo tanto baje su presión (creando un efecto de succión), mientras que el aire que circula por debajo del ala (que en la mayoría de los casos es plana o con una curvatura menor y a la cual llamaremos intradós) mantiene la misma velocidad y presión del aire relativo, pero al mismo tiempo aumenta la sustentación ya que cuando este golpea la parte inferior del ala la impulsa hacia arriba manteniendo sustentado en el aire al avión y contrarrestando la acción de la gravedad.

En determinadas partes de un vuelo la forma del ala puede variar debido al uso de las superficies de control que se encuentran en las mismas:

- Los flaps: son dispositivos hipersustentadores que se encuentran ubicados en el borde de salida del ala, cuando están retraídos forman un solo cuerpo con el ala, los flaps son utilizados en ciertas maniobras (comúnmente el despegue y el aterrizaje), en las cuales se extienden hacia atrás y abajo del ala a un determinado ángulo, curvándola así aún más. Esto provoca una reacción en la aerodinámica del ala que genera más sustentación, al hacer que el flujo laminar recorra más distancia desde el borde de ataque al borde de salida, y previene al mismo tiempo un desprendimiento prematuro de este, proveyendo así de más sustentación a bajas velocidades y altos ángulos de ataque, al mismo tiempo los flaps generan más resistencia en la superficie alar, por lo que es necesario contrarrestarla, ya sea aplicando más potencia a los motores o picando la nariz del avión.

- Los alerones: son zonas móviles que se encuentran en las puntas de las alas y sobre el borde de salida de estas. Son los encargados de provocar el desplazamiento del avión sobre su eje longitudinal al crear una descompensación aerodinámica de las alas, que es la que permite al avión girar, ya que cuando giramos el timón hacia la izquierda el alerón derecho baja, creando más sustentación en el ala derecha, y el alerón izquierdo sube, desprendiendo artificialmente el flujo laminar del ala izquierda y provocando una pérdida de sustentación en esta; lo inverso ocurre cuando giramos el timón hacia la derecha.

- Los spoilers: son superficies móviles unidas a la parte superior del ala, su función es reducir la sustentación generada por el ala; cuando son extendidos, separan prematuramente el flujo de aire que recorre el extradós provocando que el ala entre en pérdida, una pérdida controlada podríamos decir. La diferencia entre los spoilers y los frenos aerodinámicos es que estos últimos disminuyen la velocidad del avión al generar mayor resistencia pero sin afectar la sustentación, los spoilers en cambio afectan la sustentación, por lo cual se debe de aumentar el ángulo de ataque del avión, lo cual generará mayor resistencia y por lo tanto una pérdida de velocidad. Los spoilers no deben de ser usados en condiciones de vuelo adversas tales como turbulencia, vientos cruzados, otro tipo de fenómenos atmosféricos y un estado del tiempo crítico, ya que podrían afectar la seguridad del vuelo. En las alas también se encuentran los tanques de combustible. La razón por la cual están ubicados allí es que sirven de contrapesos cuando las alas comienzan a generar sustentación, sin estos contrapesos y en un avión cargado, las alas podrían desprenderse fácilmente durante el despegue. También en la mayoría de los aviones comerciales, el tren de aterrizaje principal se encuentra empotrado en el ala, así como también los soportes de los motores.

- Los slats: Son dispositivos hipersustentadores, la diferencia está en que los slats se encuentran ubicados en el borde de ataque, y cuando son extendidos aumentan aún más la curvatura del ala, generando aún más sustentación.

2.2.4.3 Empenaje de cola

Se llama empenaje al conjunto de los planos fijos y móviles que se encuentran en la cola de unión convencional. Comparando un cierto número de empenajes resalta inmediatamente la gran variación de tipos y formas existentes, de donde se deduce que aún no se llega a una teoría definida respecto a forma, posición y tamaño de los mismos.

En algunos aviones, el empenaje y en particular algunos planos de comando, han sufrido varias transformaciones desde la aparición del prototipo, hasta haberse encontrado la forma que da a la máquina una eficiencia de comando satisfactoria.

Con el aumento constante de las dimensiones de los aviones modernos, la concepción satisfactoria de las superficies de comando se ha tornado uno de los problemas aerodinámicos más difíciles. Alteraciones muy pequeñas en la geometría de

los planos de comando, como ser pequeñas diferencias en la curvatura del perfil debido a la deformación del revestimiento por cargas aerodinámicas, hace variar los momentos.

Las cargas bruscas que se producen en una superficie señalan que la frecuencia es relativamente elevada para ráfagas de baja velocidad. La ráfaga fuerte no se produce frecuentemente en vuelo. De esta manera existe la posibilidad de un gran número de aplicaciones de cargas relativamente pequeñas, las que son más peligrosas que la aplicación de una ráfaga única extremadamente grande.

Cargas repetidas de alta frecuencia se producen en las superficies de cola. Además hay cargas fluctuantes sobre los mecanismos de comando

El modelo normal de empenaje de cola consta de dos superficies básicas, la horizontal y la vertical. Cada una tiene secciones fijas para proporcionar estabilidad y móviles para controlar mejor el vuelo. La sección fija de la superficie horizontal se llama estabilizador horizontal y suele estar en la parte frontal, mientras que en la posterior se encuentra la parte móvil llamada timón de profundidad o elevador. Algunas veces toda la superficie se puede mover y el elevador se elimina.

El **estabilizador horizontal** es semejante a un ala pequeña que se sitúa en la cola del avión. Existen casos, especialmente en aviones militares y rara vez en los civiles, en los que la superficie horizontal se haya situada por delante del ala; en estos casos se dice que está en disposición *canard*. Se divide en una parte fija delantera, denominada plano fijo horizontal, y una parte móvil detrás, denominada timón de profundidad.

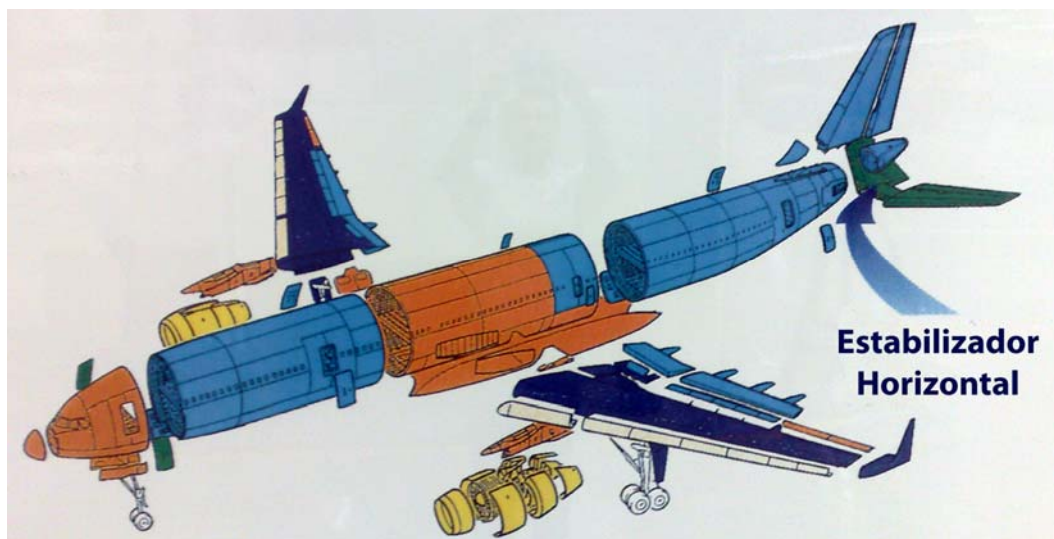


Figura 2.6 Representación de las diferentes secciones del avión, señalización del Estabilizador Horizontal

Las distintas funciones del plano horizontal de cola son:

- Proporcionar las fuerzas necesarias para el equilibrio longitudinal en vuelo horizontal
- Garantizar la estabilidad estadística longitudinal, a través de coeficientes como el auxiliar que a su vez garantiza un determinado comportamiento ante la entrada en pérdida.
- Proporcionar un comportamiento dinámico aceptable, aunque este punto es complicado en la fase del diseño conceptual.
- Proporcionar las fuerzas aerodinámicas que permitan maniobrar en el plano vertical a través de las deflexiones del timón de profundidad.

Además han de tener en cuenta cosas como:

- Las fuerzas a ejercer por el piloto quedarán por debajo de ciertos límites tanto en aviones pequeños como en grandes (sensibilidad artificial). Se considera al piloto como una persona de fuerza media para actuar sobre los mandos.
- El plano horizontal de cola no es la única solución posible aunque es la empleada en el concepto de avión convencional. Hay otras como el canard, avión sin plano horizontal,... en aviones de transporte el compromiso óptimo suele ser el diseño clásico.
- En la etapa de diseño preliminar es más difícil estudiar la cola que el ala o el fuselaje, ya que entran en juego detalles que se conocen poco y a veces es vital el estudio dinámico que no es abordable.
- En aviones con rutas largas se ha de tener en cuenta el transporte de combustible en el estabilizador horizontal, pues además de aumentar la capacidad de combustible favorece el centrado.

El timón de profundidad es una superficie estabilizadora, por lo general situado en la parte trasera de una aeronave, que controla la orientación de la aeronave cambiando el cabeceo, y también el ángulo de ataque del ala. En otras palabras, el timón de profundidad hace ascender o descender la aeronave. Un aumento del ala ángulo de ataque causará una sustentación mayor, al ser producida por el perfil del ala, y una

disminución de la velocidad de la aeronave. Una disminución en el ángulo de ataque, producirá un aumento en la velocidad. Los timones de profundidad pueden ser las únicas superficies de control del cabeceo de la aeronave (y entonces se le llama un *stabilator*), o puede ser móvil con respecto a una superficie fija o ajustable llamada estabilizador.

El ala trasera en la que están adheridos los timones de profundidad tiene el efecto contrario de un ala. Por lo general, crean una presión *descendente* que contrarresta el desequilibrio del momento debido a que el centro de gravedad del avión no está situado exactamente en el centro de presión resultante, que además de la elevación generada por el ala principal incluye los efectos de arrastre y el empuje del motor. Un timón de profundidad disminuye o aumenta la fuerza descendente creada por la parte trasera del ala. Una mayor fuerza descendente, producida por un timón de profundidad *hacia arriba*, fuerza a la cola del avión a ir hacia abajo y a la nariz del avión a ir hacia arriba y la velocidad se reduce (es decir, el ala funcionará en un mayor ángulo de ataque, lo que produce una mayor sustentación, por lo que la elevación requerida es producida a una velocidad menor). Una disminución de fuerza descendente en la cola, producida por un timón de profundidad *hacia abajo*, permite que la cola se eleve y la nariz baje. El resultado de un ángulo inferior de ataque ofrece una menor sustentación, por lo que la nave debe moverse más rápido (ya sea mediante la adición de más fuerza en los motores o al entrar en un descenso) para producir la elevación necesaria. Por lo tanto el ajuste del timón de profundidad, determina la velocidad de equilibrio del avión - una posición determinada del timón de profundidad sólo tiene una velocidad en la que la aeronave se mantendrá en una constante condición desacelerada.

En algunos aviones las superficies de control de cabeceo, inclinación o balanceo (según se entienda) están en el frente, por delante del ala; este tipo de configuración se llama *canard*, la palabra francesa para pato. Los primeros aeroplanos de los Hermanos Wright eran de este tipo. El tipo *canard* es más eficiente, ya que la superficie delantera por lo general se requiere para producir un empuje hacia arriba (en lugar de una fuerza descendente como con la cola de un avión) para equilibrar el momento del balanceo. El ala principal es menos probable que entre en pérdida, ya que la superficie de control está configurada para esa pérdida antes del ala, causando un cabeceo bajo y la reducción del ángulo de ataque del ala.

El *estabilizador vertical* está situado en la cola del avión y, de la misma forma que el estabilizador horizontal, se divide en deriva y timón de dirección.

El timón de dirección es una "superficie de control" junto con el timón-como ascensor (que se adjunta a la estructura horizontal de cola) y alerones (que se adjunta a las alas) que el control de pitch and roll. El timón es por lo general adjunto a la fin (o estabilizador vertical) que permite al piloto a controlar ya en el eje vertical, es decir, cambiar la dirección horizontal en el que la nariz es apuntando. El timón de dirección se manipula con el movimiento de pedales por el piloto.

En la práctica, tanto alerón y timón de control de entrada se utilizan junto a su vez de una aeronave, los alerones impartir roll, el timón impartir orientación, y también para compensar a un fenómeno llamado “adversas de orientación”. Adversos de orientación es fácil de ver si la mayoría simple de alerones tipo solo se utilizan para un giro. El movimiento descendente alerón actúa como un colgajo, la generación de más para levantar un ala, y, por tanto, más arrastre (aunque desde la década de 1930, muchos aviones han utilizado *alerones frise* o *diferencial de alerones*, que para compensar los efectos negativos de orientación y requieren poco o no timón de entrada se convierte en ordinario). Inicialmente, este arrastre pian la aeronave en la dirección opuesta a la deseada. El uso de timón y los alerones produce junto coordinado convierte, en la que el eje longitudinal de la aeronave está en consonancia con el arco de una vuelta, ni resbalón ping (menores de ruddered), ni el arrastre (exceso de ruddered). Inadecuadamente ruddered vueltas a baja velocidad puede precipitar un spin, que puede ser peligroso a baja altura.

Existen diversas configuraciones de colas de avión con diferentes posiciones de los estabilizadores. La posición de *cola baja* es la más común en aviones de transporte civil dotados de turbofans bajo el ala, mientras que si están adosados al fuselaje en su parte trasera se suele adoptar una *configuración en T*. La disposición *cruciforme* es habitual en aviones turbohélice, especialmente en los clásicos. La configuración de *doble estabilizador vertical* se suele utilizar en aviones desmesuradamente grandes, como el Airbus Beluga, en aviación embarcada en portaaviones o en aviones de superioridad aérea; en general, se utiliza en casos donde la superficie vertical necesaria es muy grande o la altura total está limitada. Existe una segunda versión *en cuchilla* poco usada por necesitar dos pseudofuselajes. Algunos entrenadores militares usan una disposición

en V, con dos superficies estabilizadoras que son a la vez estabilizadores horizontales y verticales.

2.2.4.4 Tren de aterrizaje

El tren de aterrizaje suele ser uno de los mecanismos más complicados de un avión. Entre sus componentes se incluye el amortiguador principal, que es una pata con una estructura muy resistente, en cuya parte inferior y antes del ensamblaje de las ruedas lleva un amortiguador hidráulico para absorber el impacto del aterrizaje. Va sujeto a los largueros del ala o del fuselaje. El mecanismo de accionamiento del tren permite extenderlo y retraerlo al accionar desde la cabina de pilotos la palanca de mando. Por lo general, se actúa con energía hidráulica. Los frenos también suelen ser hidráulicos y provistos de sistema antideslizante. Suelen llevar un mecanismo detector de modo, aire/tierra, que activa o desactiva varios sistemas del avión, según esté volando o en el suelo.

Hay varios tipos de trenes de aterrizaje, el más común es el triciclo. Consta de dos patas principales situadas detrás del centro de gravedad del avión y una tercera más pequeña en el morro. Ciertos aviones muy grandes pueden llevar tres y hasta cuatro patas principales y cuatro ruedas por cada pata. Otro modelo es el convencional con dos patas principales delante del centro de gravedad y una tercera muy pequeña situada en la parte inferior de la cola. El aterrizaje es más fácil con el tren triciclo, ya que permite un mejor frenado al no existir riesgo de golpear con el morro del avión en el suelo. También mejora la maniobrabilidad y visibilidad durante el rodaje por el suelo. Otros tipos de tren de aterrizaje pueden llevar bandas de rodadura tipo oruga para cargas pesadas en campos de aterrizaje no preparados, giratorios para viento cruzado, o una combinación de esquís y ruedas para aterrizar sobre hielo o nieve.

2.2.5 CONTROLES DE VUELO

Los componentes necesarios para el control de vuelo de los aviones modernos constan de varios sistemas que se manejan desde la cabina de pilotos mediante una palanca de mando, con o sin volante, los pedales de dirección y un conjunto de instrumentos que proporcionan la información necesaria para su uso.

1. Mandos de vuelo

La actitud de un aeroplano se define como su orientación relativa al horizonte y a la dirección de su movimiento. Se controla por medio de tres sistemas de mandos de vuelo, cada uno de los cuales actúa en su eje correspondiente moviendo el timón de profundidad, el de dirección o los alerones que se encuentran en la parte posterior de las alas. Todos se accionan desde la cabina de pilotos: el primero con la palanca, el segundo con los pedales, y los alerones con el volante. En los aviones pequeños, que suelen carecer de volante, la palanca que mueve el timón de profundidad, si se inclina a un lado o a otro, mueve también los alerones.

El timón de profundidad permite el movimiento de cabeceo y hace girar al avión sobre el eje transversal. Al tirar hacia atrás de la palanca de mando, se levanta el timón, disminuye su sustentación, baja la cola y, por tanto, sube el morro. Si se mueve la palanca hacia adelante se produce el efecto contrario haciendo picar al avión.

Los alerones están colocados cerca de la punta del ala y hacia el borde posterior, y permiten el movimiento de alabeo y hacen girar al avión sobre el eje longitudinal. Si se mueve el volante de mando a la izquierda o se inclina en la misma dirección la palanca cuando no hay volante, el alerón izquierdo se levanta y el derecho baja, produciéndose así una inclinación de las alas hacia la izquierda. Si se mueve el mando a la derecha, se inclinarán hacia ese lado.

Los pedales controlan el movimiento de dirección y hacen girar al avión sobre el eje vertical. En coordinación con los alerones, permiten cambiar el rumbo del avión. Cuando se presiona el pedal derecho, el timón se mueve y hace girar el avión hacia la derecha y si se empuja el pedal izquierdo, el giro será hacia la izquierda; pero hay que inclinar la palanca a la vez y hacia el mismo lado para evitar que el avión derrape. El alabeo es al avión lo que el peralte de una curva al automóvil.

Los aviones llevan un conjunto de mandos secundarios para asegurar un manejo más sencillo y efectivo de las superficies de control. Así, los compensadores se usan en el timón de profundidad, de dirección y de alabeo para ajustar el equilibrio de las superficies aerodinámicas asociadas, por tanto, los pilotos no tienen que realizar mucha fuerza sobre el mando correspondiente. Los *flaps* y *slats* aumentan la sustentación para reducir la velocidad de despegue y aterrizaje. Los *spoilers*, aletas alineadas con la superficie superior de las alas, se pueden extender usándolos como frenos

aerodinámicos tanto en vuelo como en el aterrizaje; coordinados con los alerones, se utilizan para mejorar el control de alabeo. Los frenos aerodinámicos van en los planos; son dos o más superficies que, accionadas desde la cabina, se extienden poco a poco hasta llegar a ser perpendiculares a la dirección del vuelo, ayudando a disminuir la velocidad del avión. Todos estos sistemas se pueden controlar de diversas maneras, ya sea eléctrica, mecánica o hidráulicamente. Cuando el control se realiza mediante señales eléctricas, recibe el nombre de *fly-by-wire*. Si es por medio de señales ópticas, se llama *fly-by-light*.

2. Instrumentos



Figura 2.7 Cockpit A380 (Airbus)

La información necesaria para volar requiere datos de al menos cuatro sistemas: planta de potencia, instrumentos de vuelo, instrumentos de aterrizaje y ayudas a la navegación. Los instrumentos de la planta de potencia indican todos aquellos parámetros que permiten conocer el funcionamiento del motor, y son, entre otros: el tacómetro, que muestra las revoluciones por minuto de cada motor, los indicadores de presión y temperatura de aceite y el medidor de flujo de combustible. Los instrumentos primarios de vuelo dan información de velocidad (anemómetro), dirección (brújula magnética y giroscopo direccional), altitud (altímetros) y actitud (variómetro, bastón, bola y horizonte artificial). Varios de ellos, así como el piloto automático, utilizan datos

recibidos de los giróscopos o de las plataformas inerciales, ya sean convencionales o de láser, que suministran información sin ninguna ayuda exterior.

Los instrumentos de aterrizaje necesarios para operar con baja visibilidad son de dos tipos: sistema instrumental de aterrizaje (ILS), que envía señales directas al piloto para asegurar una correcta trayectoria de aproximación, y el control de aproximación de tierra (GCA), que utiliza equipos de radar instalados en tierra para guiar al piloto mediante instrucciones verbales transmitidas por radio durante la maniobra. El ILS se usa en aviación civil y el GCA en la militar, aunque cada vez se extiende más el uso del ILS en ambas. El sistema de luces de aproximación (ALS) proporciona una ayuda visual durante los últimos metros del descenso.

2.2.6 PROPULSIÓN

Hay dos sistemas de tracción que permiten volar a un aeroplano: la hélice y la propulsión a chorro. La hélice puede ser movida tanto por un motor de combustión interna como por un motor turboreactor. Encontramos dos tipos de motores:

- El motor de pistón, utilizado por aviones propulsados por hélice. Puede ser de dos tipos: de cilindros y rotativo.
- Los motores de reacción. El motor de reacción se basa en el principio de acción y reacción y se divide en tres grupos: el turboreactor, el turbopropulsor y el cohete

2.2.7 AEROPLANOS. TIPOS Y USOS

Los aeroplanos se pueden clasificar en tres tipos según su función y el ámbito de operación: comerciales, incluyendo los de transporte de pasajeros y carga, ya sea en líneas regulares o chárter, militares y aeroplanos de la aviación general, que son los no comprendidos en los otros dos. Las particulares características de cada avión están determinadas por la naturaleza de los servicios a realizar.

1. Aeroplanos Comerciales

En Europa el avión fue utilizado para transporte de pasajeros en el año 1919, mientras que en Estados Unidos los primeros vuelos de la aviación comercial se dedicaron principalmente al correo. Los vuelos de pasajeros aumentaron en rutas como

la de Londres a París, se introdujeron en Estados Unidos a partir de 1927 y crecieron más deprisa gracias a la aparición de aviones seguros y confortables como el Douglas DC-3. Este avión iba propulsado por dos motores de hélice y podía transportar 21 pasajeros a una velocidad de crucero de 300 km/h. Todavía se puede ver volando por los cielos de muchos países. Poco después aparecieron los aviones cuatrimotores, que podían volar aún a mayor velocidad, subir más alto y llegar más lejos. El siguiente paso se dio en 1950, con el Vickers Viscount británico, primer avión impulsado por hélice movida por turbina de gas.

Los aviones para cubrir un servicio se eligen en función de dos factores: el volumen de tráfico y la distancia entre los aeropuertos a los que sirve. La distancia entre aeropuertos se conoce como recorrido y hay un elevado número de aviones que pueden operar entre 400 y 11.000 kilómetros.

Los reactores comerciales de pasajeros se usaron al principio para recorridos de larga distancia.

2. Aeroplanos militares

Los aeroplanos militares se pueden dividir en cuatro categorías: combate, carga, enseñanza y observación. En la categoría de combate se incluyen los aviones de caza y los bombarderos, tanto para operaciones en tierra como en mar. Hay numerosos tipos de cada uno de estos modelos. Los cazas se usan a menudo para ataques a baja cota o para interceptaciones aéreas, siendo los más representativos de los que se usan en Europa el McDonnell Douglas F-4 Phantom, el General Dynamics F-16 y el Dassault Mirage, aunque existe un proyecto que los sustituirá por el Eurofighter. El Tornado, de geometría variable, combina las funciones de defensa aérea de largo alcance, ataque y reconocimiento, sustituyendo al antiguo BAC/Dassault Jaguar. El Harrier es un avión con capacidad de despegue y aterrizaje vertical y se usa como apoyo táctico a las operaciones en tierra y como interceptor en la lucha aeronaval. Es un avión subsónico, pero su diseño está preparado para desarrollar un modelo supersónico. Otros aviones comparables usados por Estados Unidos son el McDonnell Douglas F-15 Eagle, los cazas aeronavales Grumman F-14 y McDonnell Douglas F-18, y el caza Lockheed F-117, equipado con un sistema electrónico tan sofisticado que le hace prácticamente indetectable por radar. El B-52 Stratofortress, avión subsónico desarrollado en la década

de los cincuenta, y el B-1B son los principales bombarderos de largo alcance utilizados por Estados Unidos, mientras el Fairchild A-10 Thunderbolt se usa específicamente para el ataque a los carros blindados.

El más utilizado de los aviones militares de transporte es el cuatrimotor Lockheed C-130 Hércules, y el más grande el C-5A de la misma casa constructora, que puede llevar 120 toneladas de carga. Los aviones militares de enseñanza y entrenamiento más famosos han sido el Texan T-6, de hélice, para enseñanza básica, y el reactor T-33, para enseñanza avanzada. Ambos están fuera de servicio, pero han formado miles de pilotos en gran parte de los países occidentales. Un modelo muy especial de avión militar es el Boeing E3 AWACS, que gracias a sus complejos sistemas de detección se ha convertido en un eficaz observatorio aéreo para controlar todo tipo de movimientos y actividades en tierra. Se le distingue con facilidad por la enorme antena en forma de seta que lleva sobre el fuselaje.

3. Aviación general

Los aviones usados para recreo privado, negocios, usos agrícolas, vuelos de instrucción civil y otros servicios especiales se pueden englobar en el término de aviación general. Hay una enorme variedad de aeroplanos en esta categoría, desde los pequeños ultraligeros de un solo asiento, los de enseñanza con dos, o los más grandes con cuatro, todos con un solo motor de pistón, hasta los más complejos bimotores a reacción, capaces de realizar vuelos transatlánticos a la misma velocidad y altura que los grandes aviones comerciales.

Uno de los campos con más aplicación de la aviación general es la agricultura, donde se utilizan aviones para fumigar o para distribuir fertilizantes y semillas. También se usa para la inspección aérea de oleoductos y tendidos eléctricos, fotografía aérea, cartografía, patrullas forestales y control de la fauna salvaje.



Capítulo 3. **MATERIALES COMPUESTOS EN LA FABRICACIÓN DEL FUSELAJE**

Material compuesto es la combinación de materiales que difieren en composición o forma a escala macroscópica. Los constituyentes mantienen su identidad en el compuesto, es decir, no se disuelven o funden entre ellos aunque funcionan conjuntamente. Los componentes pueden identificarse físicamente y muestran una interfase definida entre ellos.

Generalmente, los MMCC constan de una fase continua o matriz y de una fase discontinua o refuerzo, que presentan diferente composición y morfología según la funcionalidad o propiedades que se pretenden conseguir.

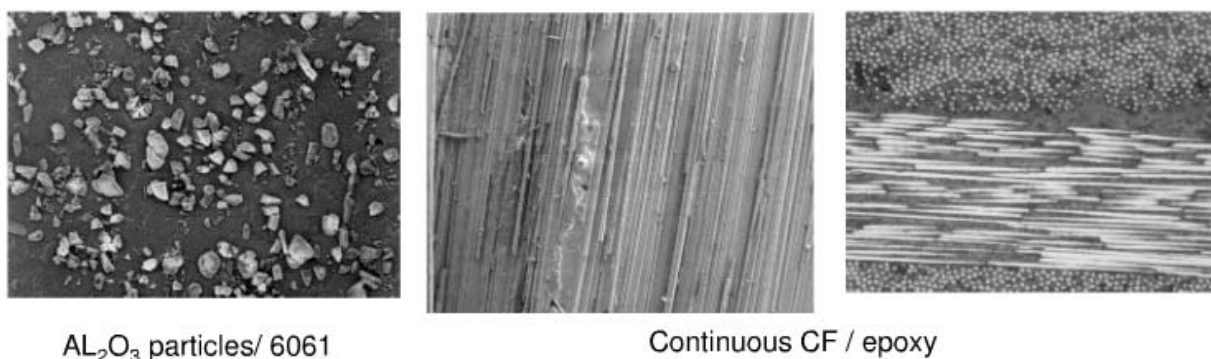


Figura 3.1 Tipos de materiales compuestos

Estudiaremos de aquí en adelante los materiales compuestos de matriz polimérica y fibras de refuerzos continuas de utilización en la industria aeroespacial. Principalmente materiales reforzados con fibras de carbono (CFRP)

3.1 MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS

- Constituyentes

- ✓ Fibras: carbono, vidrio, aramida, SiC, boro,...
- ✓ Matriz: poliméricas (resinas), metálicas, cerámicas

- Tipos

- ✓ MMCC de Fibra continua
- ✓ MMCC de Fibra larga (6-80 mm)

- ✓ MMCC de Fibra corta (0.5-6 mm)

Las ventajas fundamentales de los materiales compuestos reforzados con fibras son:

- ✓ Altas características mecánicas específicas.
- ✓ Diseño a medida
- ✓ Alta resistencia química
- ✓ Buen comportamiento frente al fuego
- ✓ Reducción del número de componentes /elementos de unión
- ✓ Buen comportamiento a fatiga.
- ✓ No existen problemas de corrosión.
- ✓ Gran estabilidad dimensional
- ✓ Ahorro en peso.

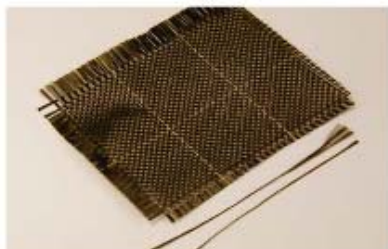
Inconvenientes de los materiales compuestos reforzados con fibras:

- ✓ Costosos programas de evaluación, calificación y certificación de estructuras.
- ✓ Realización de costosas inversiones en instalaciones y equipos.
- ✓ Coste de los materiales elevado.
- ✓ Entrada de agua en estructuras sándwich.
- ✓ Baja resistencia a impacto
- ✓ Isotropía/anisotropía
- ✓ Protecciones adicionales frente al rayo. Baja conductividad eléctrica
- ✓ Difícil reciclado

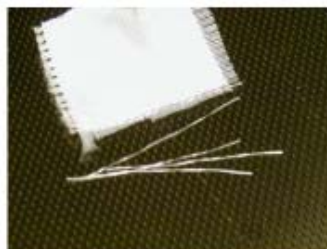
Funcionalidad de fibra en un material compuesto

- ✓ Proporcionan la resistencia y rigidez al material.
- ✓ Dirigen el comportamiento mecánico de los materiales compuestos dependiendo del tipo de fibra utilizado y la orientación.
- ✓ Tratamiento superficial de la fibra es fundamental para las características finales del material compuesto.

Las fibras más habituales son las de carbono, vidrio, aramida (kevlar) y otras (boro, SiC, etc.). En la figura 3.2 podemos ver estas fibras:



Fibra de Carbono



Fibra de Vidrio



Fibra de Aramida (Kevlar)

Figura 3.2 Diferentes tipos de fibras

Tabla resumen de características generales.

	VIDRIO	CARBONO	KEVLAR
PRECIO	Medio	Muy caro	Caro
RESISTENCIA ESPECIFICA	Media	Alta	Muy Alta
RIGIDEZ	Baja	Alta	Media
DENSIDAD (Comparando con el aluminio)	Similar	Más baja	Mucho más baja
APLICACIONES GENERALES	Estructuras secundarias	Estructuras primarias y secundarias	Estructuras Secundarias

3.2 FIBRA DE CARBONO

Los diferentes tipos de fibra de carbono existentes son:

- ✓ Fibras de alta resistencia. Aplicación general en industria aeronáutica civil y parcialmente espacial y militar y de forma general en tejidos de refuerzo

- ✓ Fibras de modulo intermedio. Utilización en la industria aeronáutica civil y militar para aplicaciones estructurales de alta responsabilidad estructural
- ✓ Fibras de alto modulo. Aplicación en la industria espacial para aplicaciones que requieran muy alta estabilidad térmica

Proceso de fabricación.

Las altas características mecánicas de las fibras de carbono son debidas al alto grado de orientación de los cristales a lo largo de los ejes de las fibras. Dependiendo del proceso de fabricación se obtienen fibras de alta resistencia y alargamiento a la rotura o fibras de alto módulo (llamadas fibras de "grafito") de gran aplicación en el campo aeroespacial.

Morfología.

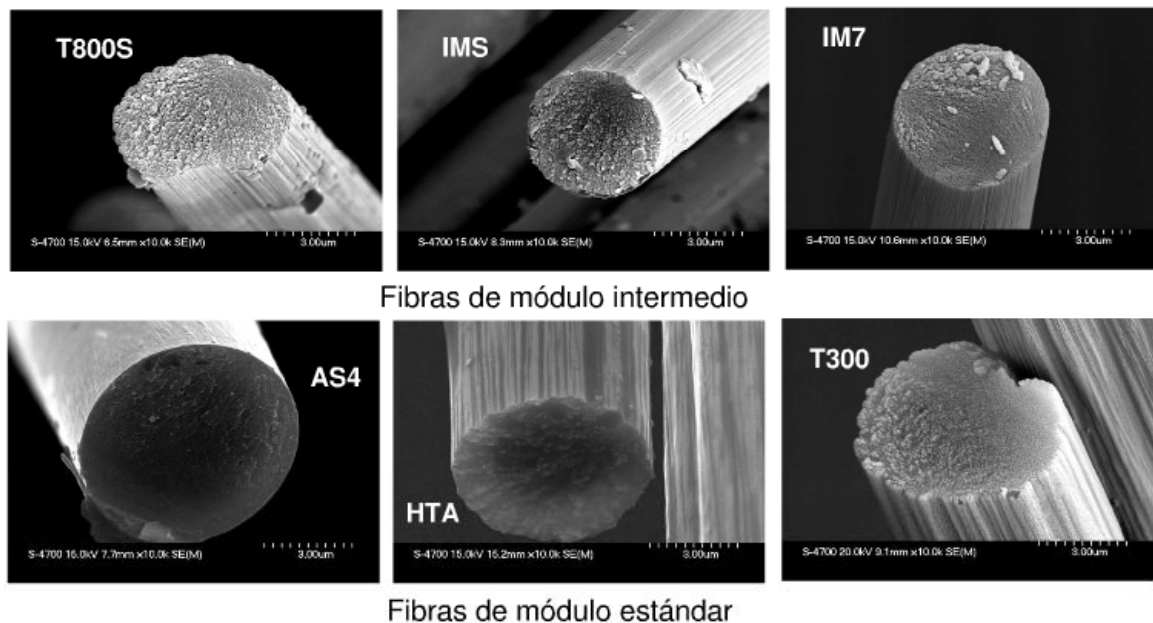


Figura 3.3 Diferentes fibras vistas al microscopio electrónico (Documentación Proveedores)

Generalidades

- ✓ Las funciones principales de la matriz en el material compuesto son las siguientes:
- ✓ Proporcionar cohesión entre las fibras.
- ✓ Transmitir las cargas aplicadas al material compuesto.
- ✓ Proteger de las fibras del daño mecánico y del medio ambiente.

- ✓ Determinar la temperatura de servicio del material compuesto y controlar la resistencia del "composite" frente al medio ambiente y agentes externos.

Tipos de matrices orgánicas:

Resinas termoestables: epoxídicas

- ✓ Son polímeros con uno o más grupos reactivos.
- ✓ Su curado se produce mediante reacción de poliadición de una resina base con un agente de curado (aminas, anhídridos, etc.).
- ✓ Las propiedades varían dependiendo de la resina base, agente de curado, de los distintos modificadores que pueden añadirse y de las condiciones de polimerización.
- ✓ Presentan baja contracción y buena adhesión a la mayoría de las fibras.
- ✓ Son bastante resistentes a disolventes, ácidos y álcalis.
- ✓ Buenas propiedades mecánicas en general, la temperatura de servicio puede variar entre 60-150°C.
- ✓ Gran versatilidad en el curado, dependiendo del tipo de catalizador y endurecedor (las más utilizadas en la fabricación con materiales compuestos son las de curado a 120°C y curado a 180°C).
- ✓ Son las más utilizadas en aplicaciones estructurales.

Resinas termoestables: epoxídicas (resinas base)

Generalmente consisten en una molécula intermedia que contiene al menos dos grupos reactivos epoxis.

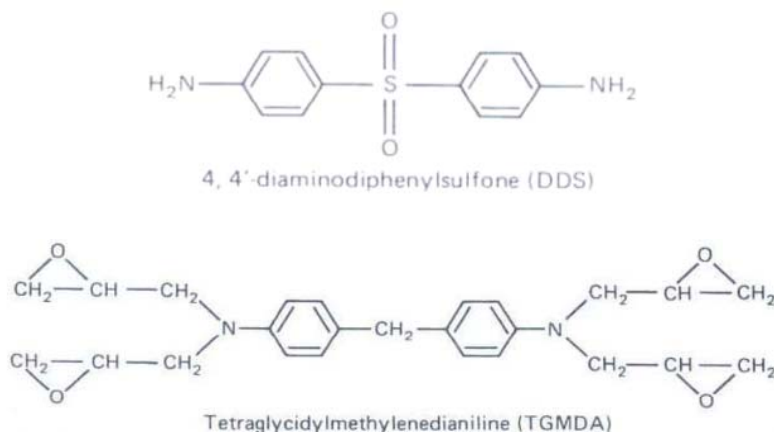


Figura 3.4 Estructura molecular de resinas termoestables

Resinas termoestables: bismaleimidas (BMI)

Se obtienen a partir de una polimerización de una bismaleimida aromática.

- ✓ Las características generales de este tipo de resinas son:
- ✓ Buen comportamiento a altas temperaturas de servicio (intermedias entre poliimidas y resinas epoxi).
- ✓ Utilización de ciclos de curado convencionales, obteniéndose laminados de bajo contenido en huecos.
- ✓ Necesitan generalmente un postcurado para conseguir propiedades óptimas
- ✓ Buenas propiedades mecánicas en húmedo y caliente.
- ✓ Presentan microagrietamiento en exposiciones prolongadas a altas temperaturas

Resinas termoplásticas

Aunque las resinas comentadas anteriormente se enmarcan dentro del grupo de resinas termoestables, en la actualidad se está desarrollando un esfuerzo considerable para intentar sustituirlas por matrices de tipo termoplástico.

Las principales ventajas que presentan estas resinas son:

- ✓ Materiales con tiempo de vida ilimitado
- ✓ Almacenaje a temperatura ambiente
- ✓ Mejor resistencia a impacto y humedad
- ✓ Tenacidad (deformación en rotura 30%-100%)
- ✓ Buen comportamiento FST (fire, smoke & toxicity)
- ✓ Velocidad de procesado
- ✓ Reprocesabilidad

Las principales desventajas de estas resinas son:

- ✓ Materiales de elevado coste
- ✓ Costes de procesado altos (alta temperatura y presión)
- ✓ Tratamiento superficial de las fibras de carbono
- ✓ Materiales auxiliares especiales

Materiales termoplásticos estructurales en la industria aeronáutica

- Termoplásticos procesados por inyección o mecanizado:
 - Reforzados con fibra de carbono o vidrio: PEEK.PA, PTFE
 - Termoplásticos amorfos
 - ✓ Baja resistencia a fluidos agresivos
 - ✓ Amplia ventana de procesado
 - ✓ Ejemplos: PEI
 - Termoplásticos semicristalinos
 - ✓ Muy buena resistencia a fluidos agresivos
 - ✓ La ventana de procesado puede resultar crítica (especialmente la velocidad de enfriamiento)
 - ✓ Ejemplos: PEEK, PPS, PEKK.

Dependiendo del tipo de procesado posterior, existen diferentes tipos de materiales semielaborados disponibles:

- Materiales preimpregnados (layup manual, ATL, AFP)
 - ✓ Cintas unidireccionales
 - ✓ Tejidos
- Tejidos Secos (RTM, RFI, RLI, VARTM, etc..)
 - ✓ Tejidos unidireccionales
 - ✓ Tejidos convencionales (planos, sargas, satenes, etc.)
 - ✓ Non-crimp fabrics (NCF)
 - ✓ Otros
- Resinas líquidas (RTM, RLI, VARTM, etc..)
- Resinas en película (RFI)

3.3 MATERIALES SEMIELABORADOS

En la Fig. 3.5 podemos ver el proceso de fabricación de los materiales semielaborados desde los filamentos individuales hasta un rollo de tela de fibra.

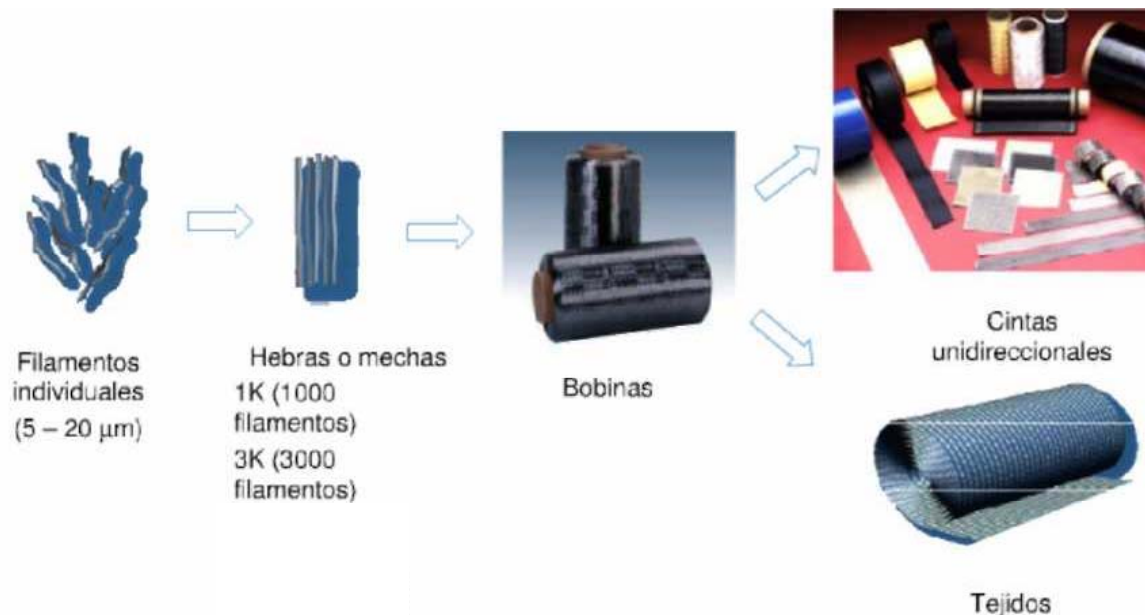


Figura 3.5 Elaboración de la tela de fibra

3.4 PREIMPREGNADOS

Es la forma más común de presentación de los materiales compuestos utilizados en la industria aeronáutica.

Los materiales preimpregnados consisten en refuerzos (cintas o tejidos) preimpregnados en una resina termoestable (en estado inicial de polimerización, estado R) ó termoplástica y capaz de procesarse en condiciones específicas. Dos de las características principales de los materiales preimpregnados termoestables son:

- ✓ Requieren un almacenaje a temperaturas de -18°C
- ✓ Tienen tiempo de vida limitado.

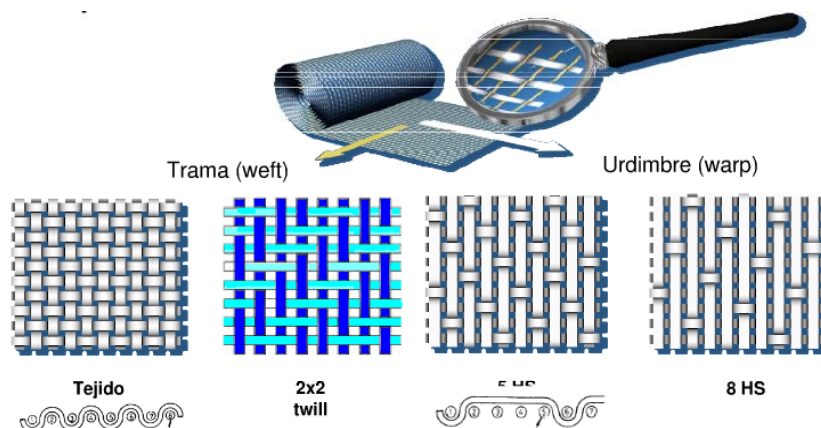
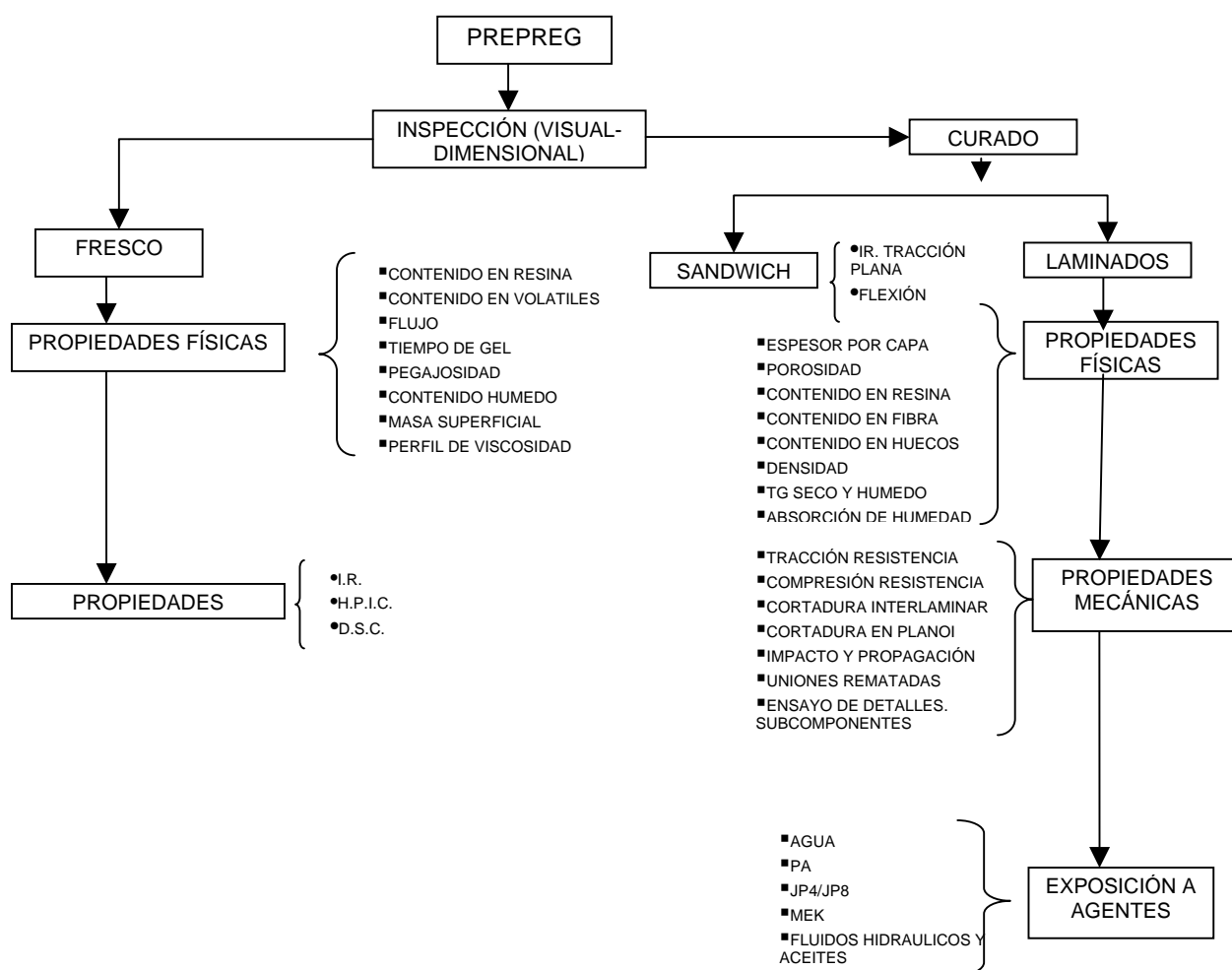


Figura 3.6 Diferentes formas de tejido (Documentación Proveedores)

3.5 CARACTERÍSTICAS Y CLASIFICACIÓN.

El siguiente diagrama de flujo resume las características y clasificación de los materiales compuestos.



3.6 ESTRUCTURAS SÁNDWICH

Uno de los principales problemas y limitaciones del material de revestimiento es su falta de rigidez. Tal como veremos más adelante, los revestimientos tienen que hacerse más gruesos de lo que sería necesario, debido a que pueden pandear sometidos a cierto tipo de cargas; una tira de papel demuestra muy bien este problema, se puede tirar de él pero no se puede comprimir.

Una manera de proporcionar rigidez a láminas delgadas es hacer un "sándwich" con una hoja muy fina, una capa de un material central muy ligero pero bastante rígido y otra hoja fina, todo pegado con un adhesivo adecuado. Como ocurrió con las estructuras semimonocasco convencionales, la construcción de madera marcó también el camino de las estructuras sándwich. El famoso y elegante De Havilland Mosquito de 1940 fue construido con revestimiento de madera contrachapada a cada lado de un núcleo de madera de balsa. En las estructuras importantes de hoy, un núcleo de metal, parecido a las celdillas de un panal con placas laterales metálicas, parece ser la solución más adecuada.

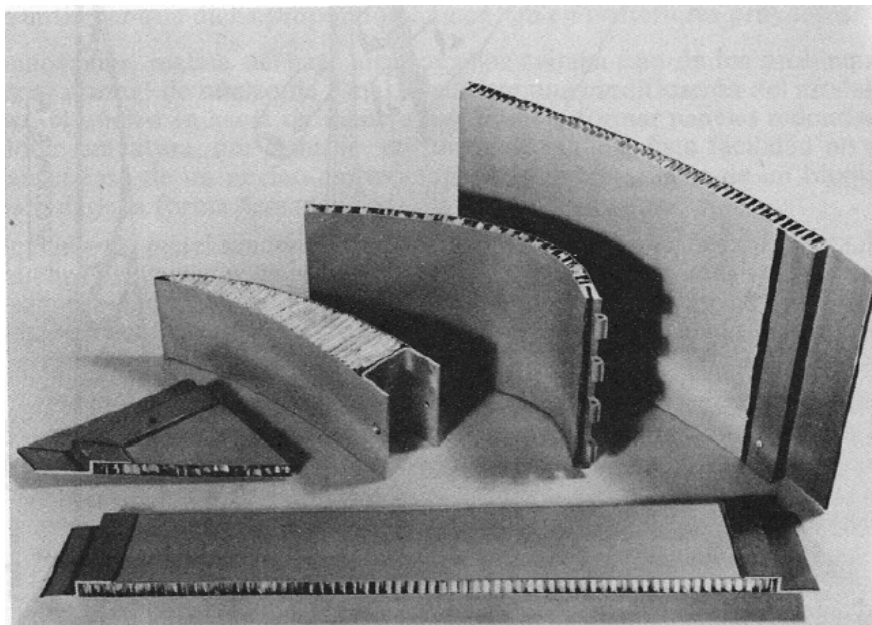


Figura 3.7 Diferentes tipos de estructuras Sándwich (Cutler, Estructura del avión)

Aunque las ventajas del sándwich tipo panal han sido reconocidas durante muchos años y las placas planas fabricadas del mismo son efectivamente un producto estándar, los elementos curvos como los de la Fig. 3.7 son difíciles de hacer y, por tanto, caros. No obstante, tal como muestra la Fig. 3.9, un porcentaje apreciable de la estructura del

Boeing 787 es de tipo sándwich y podemos anticipar que dicha proporción aumentará en posteriores proyectos.

Una innovación inglesa de hace algunos años evitaba uno de los problemas del material normal de núcleo de panel. Mediante una modificación del modelo hexagonal, el núcleo se hacía de manera que pudiera formar paneles redondeados de doble curvatura, por ejemplo, en forma de cúpula. Esta facilidad no es posible en el caso de un núcleo convencional que debía tallarse de un bloque grande para darle la forma deseada.

La adopción del panel sándwich con núcleo de panel de abeja es más lenta de lo que muchos proyectistas de estructuras desearían, pero podemos afirmar casi con certeza que llegará un día en que habrá estructuras tipo "cáscara" que sean tan suaves por dentro como por fuera y también pequeños fuselajes con una relación entre espesor y diámetro exterior tan buena como la de los grandes.

Veamos en las figuras 3.8 y 3.9 los materiales con los que se fabrican las diferentes partes de 2 aviones comerciales:

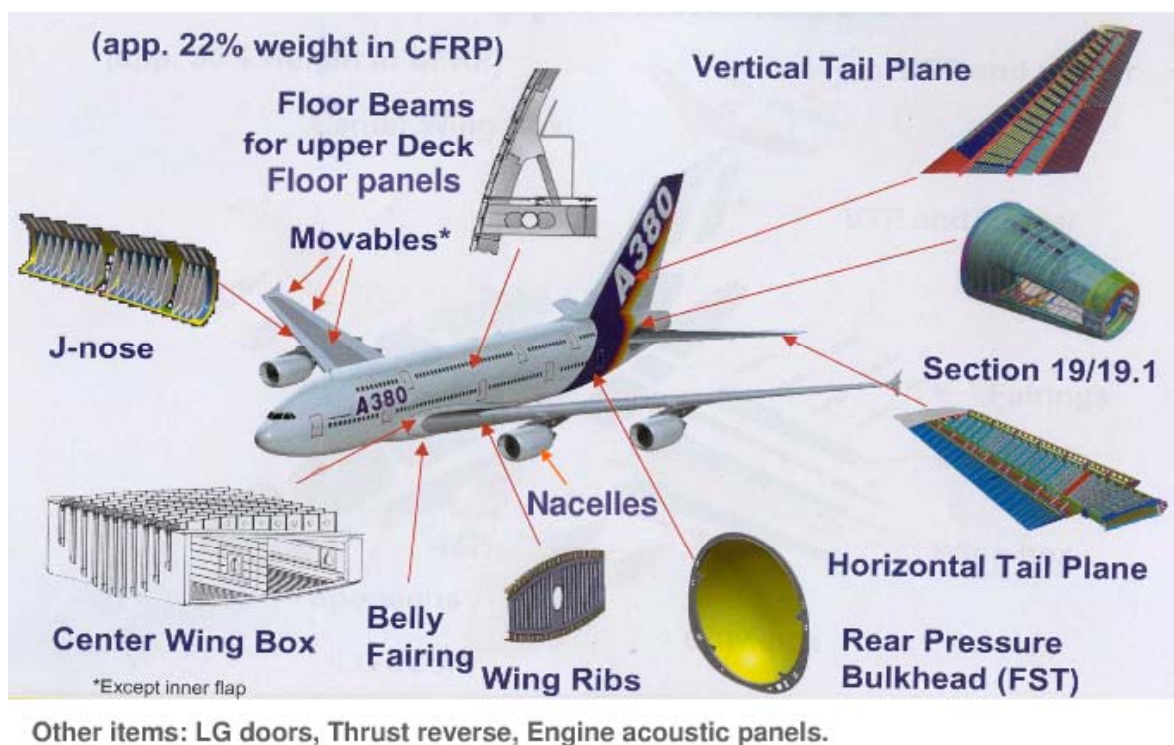


Figura 3.8 Estructura primaria Airbus A380

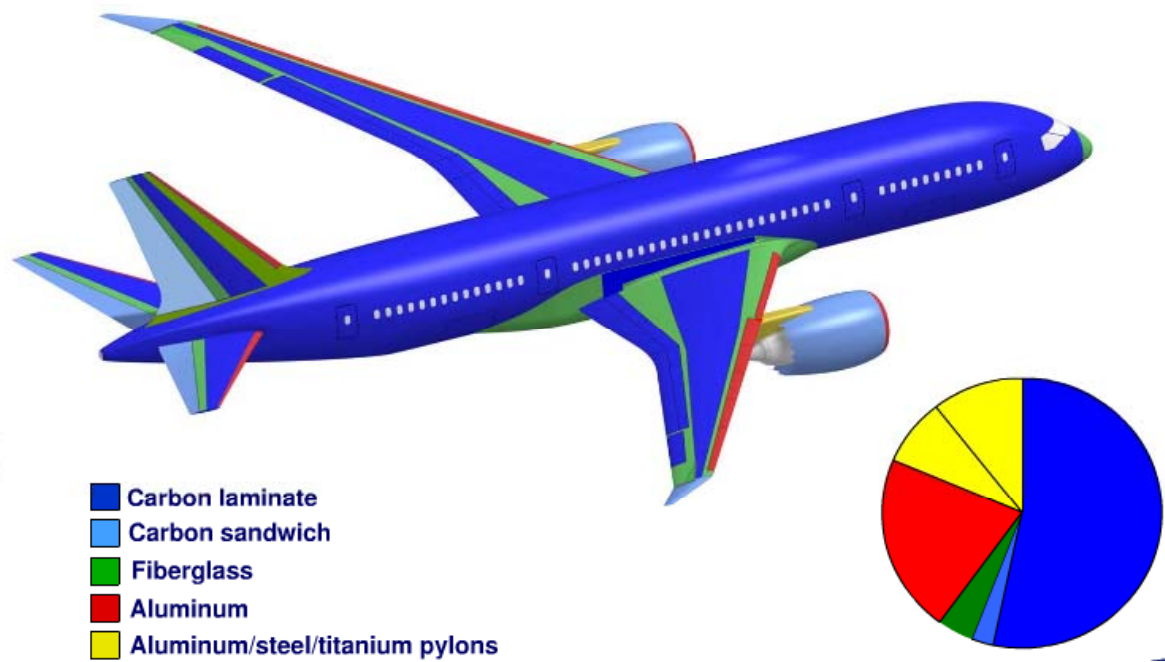


Figura 3. Estructura primaria Boeing 787



Capítulo 4. **DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

El mundo de la fabricación aeronáutica es un mundo muy preciso y complejo en el que la existencia de una pequeña holgura en la unión de los componentes que forman las partes de un avión puede provocar una gran desviación en el coste de su fabricación, debido a esto voy a tratar de introducir el problema en cuestión a fin de poder entender el análisis estadístico posterior que vamos a realizar.

El problema a tratar se encuentra una zona situada en la cola del avión (empenaje) y más concretamente en el estabilizador horizontal.



Figura 4.1 Esquema de un estabilizador horizontal en un A350 (Airbus)

Tal y como hemos visto en el Capítulo 2 y como podemos observar en la figura 4.1, el *estabilizador horizontal* es semejante a un ala pequeña que se sitúa en la cola del avión que proporciona las fuerzas necesarias para el equilibrio longitudinal en vuelo horizontalmente y garantiza la estabilidad estadística longitudinal, a través de coeficientes como el auxiliar que a su vez garantiza un determinado comportamiento ante la entrada en pérdida.

El estabilizador horizontal está compuesto de 3 partes principalmente, los cajones laterales izquierdo y derecho y el cajón central.

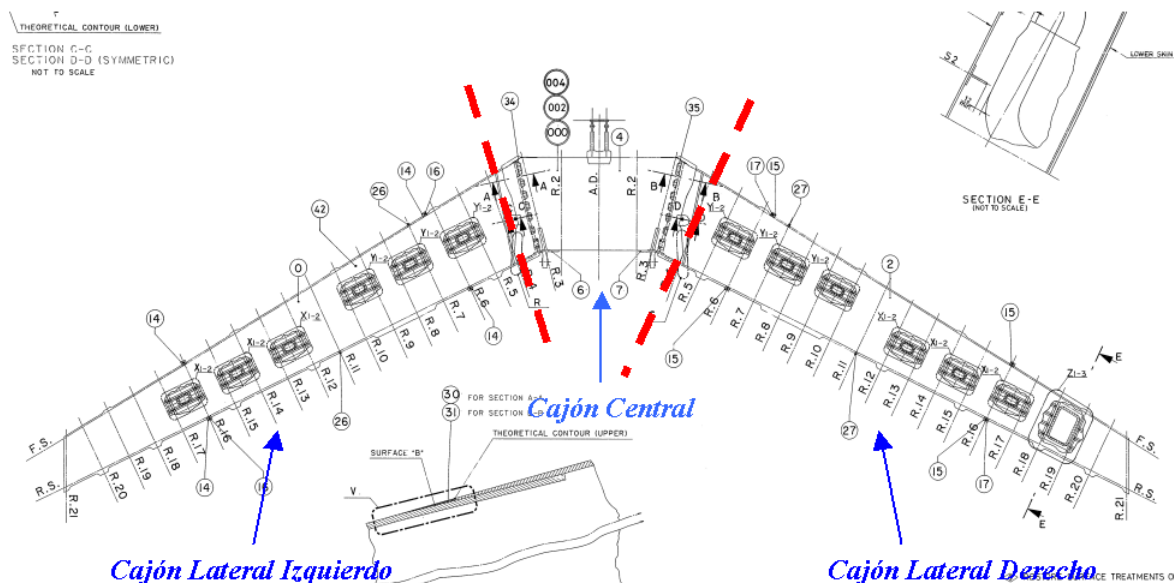


Figura 4.2 Esquema de la unión de cajones (Documentación Proveedores)

La figura anterior nos muestra un esquema de la unión de un estabilizador horizontal y las zonas de montaje o unión de los cajones laterales con el central.

El problema es cuestión, es decir la holgura que vamos a estudiar en el siguiente capítulo, aparece cuando el estabilizador horizontal se encuentra en la fase de unión de los cajones encontramos que existe una pequeña holgura en las zonas correspondientes a la unión de los cajones.

Vamos a suponer que el problema se encuentra en la fabricación de los cajones laterales, debido a que estos están fabricados con fibra de carbono mientras que el cajón central se fabrica mecánicamente con una aleación metálica de Aluminio lo que favorece que la fabricación de este se encuentre siempre dentro de tolerancia.

Para situar correctamente la holgura y las posibles causas que la pueden provocar vamos a hacer un a breve descripción del proceso de fabricación de los cajones laterales.

4.1 FABRICACIÓN DE LOS CAJONES LATERALES

Las fotografías que ilustran esta sección fueron tomadas durante la realización de este proyecto, así que corresponden con las piezas y útiles que se nombran posteriormente.

En cuanto a la fabricación nos encontramos 3 fases hasta la aparición de la holgura:

1ª Fase: es la fabricación de componentes de fibra de carbono, en esta fase se fabrican las diferentes partes tanto internas y externas que componen cada uno de los cajones laterales, tales como los revestimientos (caras exteriores del cajón lateral) que forman la cara superior e inferior externa del cajón además de las costillas y larguerillos que componen la parte interior.

Es proceso de fabricación podríamos resumirlo de la manera siguiente:

- Empilado: la maquina de encintado coloca las telas de fibra de carbono en la posición adecuada sobre una cuna (utillaje metálico en forma de cama donde se apilan las telas hasta conformar el revestimiento) según un patrón.



Figura 4.3 Maquina de encintado apilando telas sobre cuna (Documentación proveedores)

- Formación de la bolsa de vacío: compactación de las capas de laminado e instalación de termopares y tomas de presión.

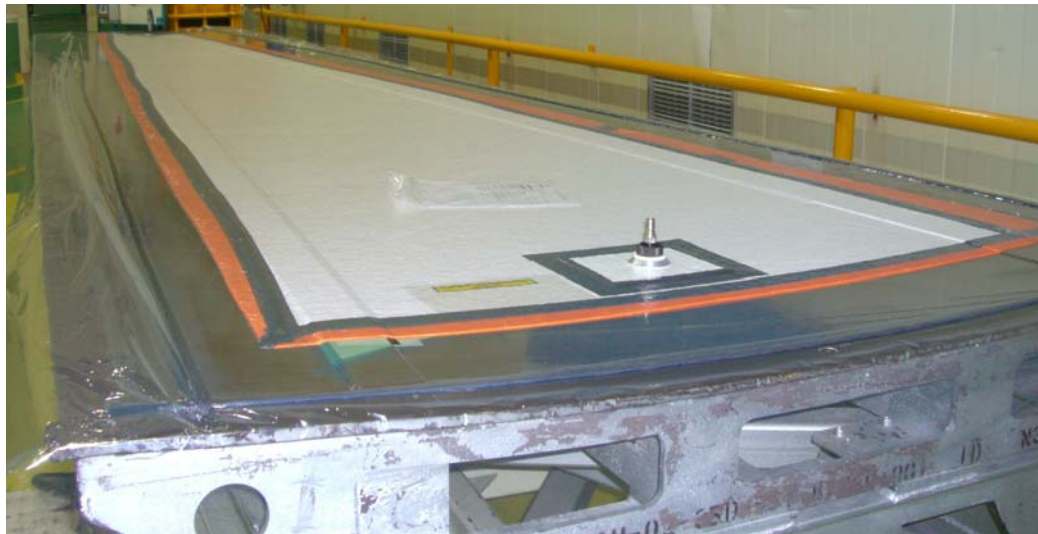


Figura 4.4 Bolsa de vacío aplicada a un revestimiento (Documentación proveedores)

- Curado en autoclave³ con presión y temperaturas controladas.



Figura 4.5 Autoclave (Documentación Proveedores)

³ Autoclave: horno industrial con las propiedades de una olla a presión de gran tamaño.

- Colocación de partes internas (larguerillos y amarre de costillas) sobre los revestimientos.



Figura 4.6 Revestimiento con larguerillos (Documentación Proveedores)

En este momento pasamos a la siguientes fase:

2ª Fase: es el ensamblaje de subconjuntos estructurales (cajones), en esta fase se unen las diferentes partes que componen un cajón lateral para ello se utiliza utillaje para la unión mecánica mediante remachado de los distintos elementos que componen este. Estas subestructuras quedan preparadas para la unión en la fase final.



Figura 4.7 Foto panorámica de los cajones laterales izquierdo y derecho a la espera del montaje final (Proveedores)

3ª Fase: es la unión de cajones, esta es la fase crítica en la que encontramos la holgura al unir los cajones laterales con el cajón central.

Como hemos visto en la figura de la fase anterior los cajones laterales quedan totalmente ensamblados y listos para la unión de ambos con el cajón central.

El procedimiento a seguir en esta fase es muy sencillo ya que se limita simplemente a colocar los cajones sobre unos útiles y ajustarlos para el taladrado posterior.



Figura 4.8 Foto panorámica de la parte frontal de los cajones montados sobre el útil antes de la unión (Documentación)

En este momento es cuando nos encontramos la existencia de esa holgura, vamos a hacer un zoom sobre la foto anterior para situar los puntos de medida.

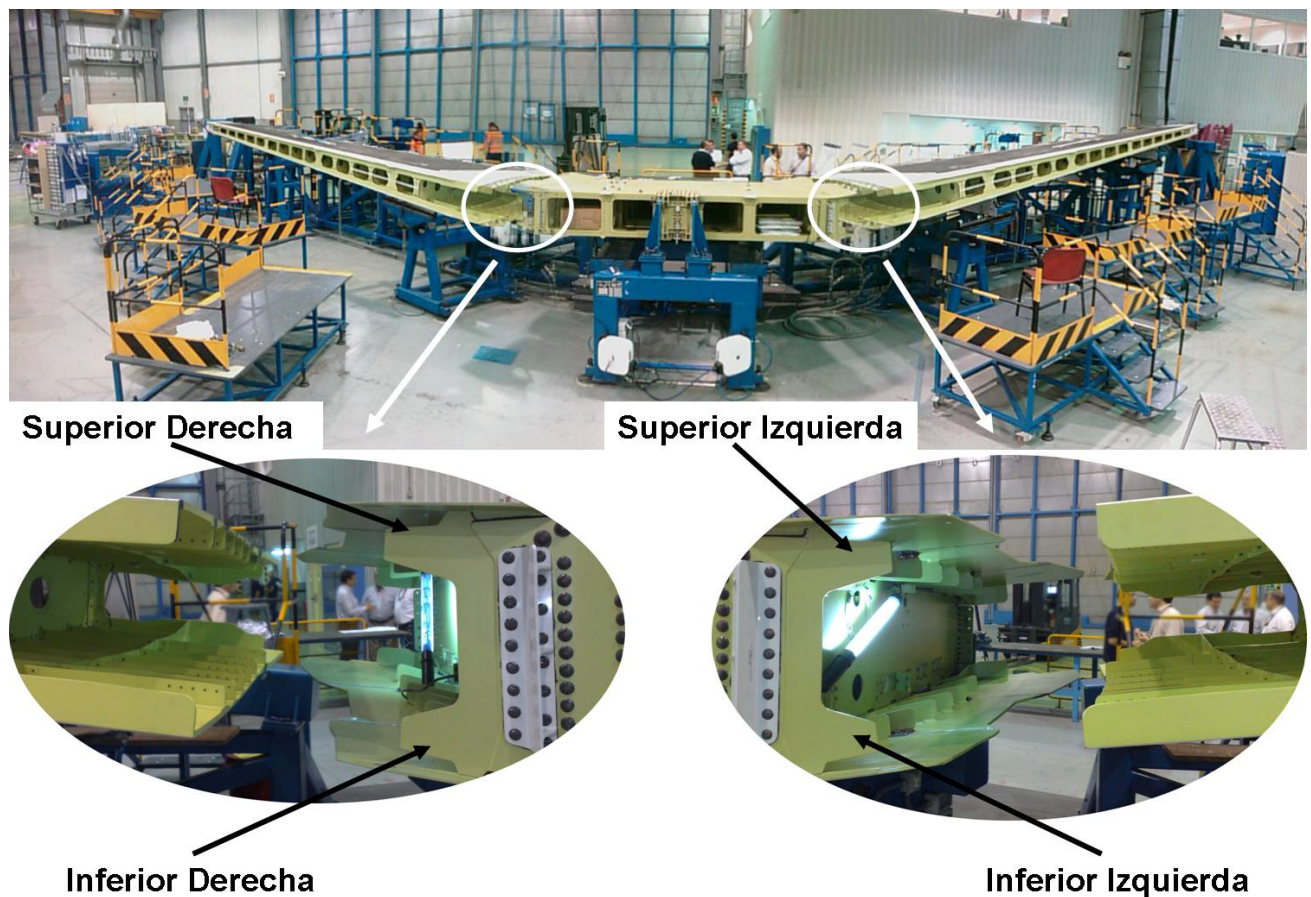


Figura 4.9 Situación de los puntos de medida

Es importante mencionar para que se entienda el porque de la realización de este proyecto que cuando tomamos las medidas, lo veremos en el siguiente capítulo, estas tienen unos valores comprendidos entre 0 y 5 mm aproximadamente y es necesario

explicar que cuando la medida de la holgura es mayor que 1.2 mm se produce un sobrecoste en la fase de unión de cajones debido a que hay que añadir un suplemento en caliente en dicha zona cuya función es compensar dicha holgura. Este suplemento es conocido como “caliente” ya que se fabrica igual que la fibra de carbono (mediante un proceso de curado), cabe decir además que si esta holgura es menor que 1.2 mm se suplementa en frío, es decir, se coloca una fina lámina de fibra de carbono en la zona de la holgura que por el contrario no lleva ningún coste asociado.

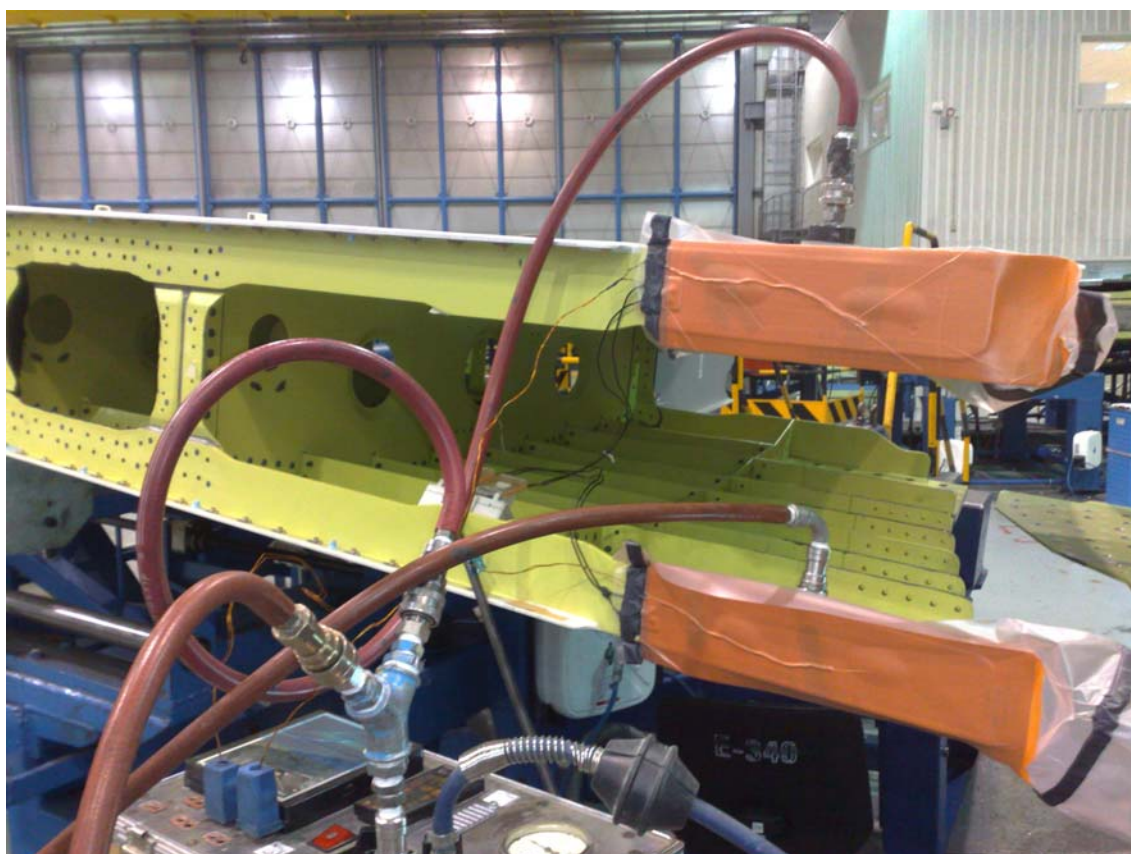


Figura 4.10 Proceso de curado de un suplemento en caliente (Documentación Proveedores)

4.2 TOMA DE DATOS

Para realizar el correspondiente análisis hemos realizado la medida de la holgura en 125 aviones consecutivos en un periodo comprendido entre el 25/03/2008 y el 06/10/2009. Dichas medidas de holgura han sido tomadas en la 3ª Fase en el momento que se ha procedido a la unión de los cajones laterales y el cajón central.

El procedimiento para la medida ha sido la introducción de galgas como las de la Fig. 4.12 en el hueco correspondiente hasta encontrar la galga con el espesor que más se ajuste a la holgura, procediéndose después a la anotación del valor obtenido en la zona

de medida para posteriormente suplementar en frío o en caliente según el caso. Ver Fig. 4.11.



Figura 4.11 Toma de medida en uno de los puntos correspondiente a 2,9 mm.

Figura 4.12 Galgas empleadas para la medida

Las medidas tomadas han sido las siguientes:

IZQUIERDO		DERECHO		AVION	FECHA MEDIDA
SUP. (1)	INF. (2)	SUP. (3)	INF. (4)		
3.2	1.4	1.2	2.1	1	25/03/2008
0.5	0.9	2.4	3.1	2	27/03/2008
2.5	3.8	3.2	4.1	3	03/04/2008
2.6	3.9	4.2	3.2	4	04/04/2008
2.7	1.7	3.2	4.3	5	08/04/2008
2.6	1.8	1.8	3.9	6	11/04/2008
2.5	0.7	3.4	2.5	7	16/04/2008
3.0	2.6	2.4	2.5	8	18/04/2008
1.4	1.3	3.0	3.2	9	23/04/2008
1.7	1.8	2.7	3.0	10	28/04/2008
2.7	3.4	3.7	1.8	11	05/05/2008
1.7	3.0	2.5	3.2	12	07/05/2008
0.9	2.4	3.3	1.9	13	13/05/2008
2.4	2.2	2.0	2.4	14	20/05/2008
2.5	3.1	3.7	5.0	15	23/05/2008
2.2	2.1	0.0	4.1	16	28/05/2008
3.5	3.4	2.0	2.7	17	30/05/2008
1.8	3.2	1.4	0.7	18	05/06/2008
2.6	1.1	1.7	4.1	19	16/06/2008



1.2	3.4	2.3	3.8	20	16/06/2008
2.4	2.3	2.9	4.3	21	20/06/2008
2.6	3.2	2.6	1.3	22	25/06/2008
1.8	1.7	3.2	2.7	23	30/06/2008
1.5	0.4	0.7	2.8	24	03/07/2008
1.7	3.2	2.0	2.7	25	07/07/2008
3.4	3.4	2.7	1.7	26	08/07/2008
2.4	1.8	2.9	2.8	27	11/07/2008
0.0	0.0	4.2	4.2	28	16/07/2008
3.2	1.3	2.8	3.6	29	22/07/2008
1.7	1.8	2.2	2.9	30	14/08/2008
1.6	1.2	2.0	0.8	31	01/09/2008
3.0	2.5	1.8	2.3	32	25/08/2008
2.4	2.8	2.6	3.0	33	02/09/2008
1.1	2.9	2.9	1.4	34	05/09/2008
3.6	4.8	2.9	3.6	35	10/09/2008
2.7	2.1	0.0	3.0	36	15/09/2008
2.7	3.6	1.7	0.0	37	18/09/2008
2.2	2.2	2.1	0.7	38	23/09/2008
1.7	2.4	1.8	3.7	39	26/09/2008
2.4	2.7	0.8	1.7	40	01/10/2008
0.6	4.0	0.5	1.9	41	03/10/2008
2.2	1.1	2.1	0.0	42	07/10/2008
1.2	2.8	0.5	2.0	43	10/10/2008
2.1	2.4	2.8	1.8	44	15/10/2008
0.7	1.0	1.4	1.1	45	17/09/2008
1.2	2.8	0.7	3.5	46	23/10/2008
2.0	2.0	3.7	1.2	47	27/10/2008
1.7	3.1	3.2	1.2	48	04/11/2008
2.5	3.8	3.2	2.2	49	06/11/2008
2.0	2.5	2.6	3.1	50	13/11/2008
1.9	3.1	3.8	3.0	51	17/11/2008
1.9	3.9	4.3	2.6	52	18/11/2208
2.0	2.1	2.9	1.2	53	25/11/2008
2.5	2.3	2.8	1.4	54	27/11/2008
2.4	3.7	1.8	1.6	55	01/12/2008
1.4	1.9	4.4	3.1	56	04/12/2008
3.9	4.2	1.5	4.3	57	10/12/2008



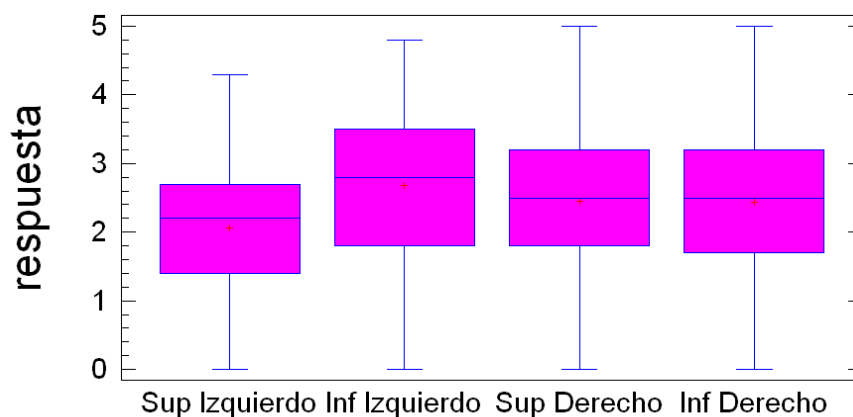
4.3	1.7	5.0	2.8	58	15/12/2008
1.1	3.9	3.0	2.7	59	17/12/2008
1.9	3.6	3.3	2.9	60	29/12/2008
2.2	1.6	3.4	3.6	61	07/01/2009
1.0	3.8	4.3	0.8	62	12/01/2009
2.8	3.3	1.0	3.7	63	15/01/2009
0.0	3.7	2.0	4.0	64	19/01/2009
0.9	3.5	3.4	3.9	65	21/01/2009
3.7	3.2	2.3	1.0	66	23/01/2009
2.8	2.8	1.3	3.5	67	28/01/2009
2.5	3.8	1.9	2.2	68	02/02/2009
3.0	3.2	3.0	1.7	69	04/02/2009
2.4	1.1	3.0	2.8	70	09/02/2009
1.4	3.9	2.8	3.5	71	13/02/2009
1.0	3.0	3.2	2.1	72	17/02/2009
2.0	3.8	2.2	2.0	73	20/02/2009
2.1	3.6	2.2	1.8	74	25/02/2009
2.6	1.7	3.1	3.6	75	02/03/2009
0.4	3.1	2.4	2.3	76	04/03/2009
2.2	3.5	2.8	1.8	77	07/03/2009
1.2	3.9	2.5	3.2	78	11/03/2009
3.7	3.9	3.6	2.5	79	14/03/2009
0.9	2.9	2.5	1.5	80	18/03/2009
3.4	4.0	3.2	1.9	81	23/03/2009
0.6	3.5	3.8	1.4	82	26/03/2009
2.5	3.5	1.7	0.0	83	30/03/2009
4.0	4.0	2.8	3.7	84	02/04/2009
3.0	3.0	2.0	3.9	85	14/04/2009
1.5	3.1	0.6	3.8	86	17/04/2009
2.4	3.4	3.7	1.6	87	21/04/2009
3.0	2.8	1.5	2.5	88	24/04/2009
3.7	2.4	3.2	3.1	89	28/04/2009
2.8	1.5	2.5	0.8	90	04/05/2009
0.0	4.2	3.9	3.3	91	07/05/2009
2.2	4.0	3.5	3.0	92	09/05/2009
4.2	0.6	2.6	2.1	93	13/05/2009
1.3	3.1	1.2	4.3	94	19/05/2009
0.0	3.7	3.5	1.4	95	22/05/2009



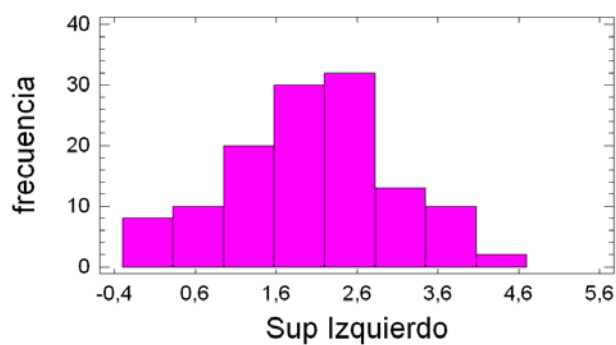
3.5	3.7	1.0	2.7	96	25/05/2009
1.8	3.8	2.6	2.3	97	28/05/2009
0.7	2.8	1.2	0.0	98	02/06/2009
0.3	3.7	2.5	0.3	99	06/06/2009
1.5	3.9	1.3	2.8	100	10/06/2009
3.0	3.2	0.8	2.0	101	15/06/2009
1.2	1.8	3.4	2.3	102	18/06/2009
0.0	3.2	3.4	2.2	103	22/06/2009
1.2	2.4	2.8	3.2	104	25/06/2009
3.2	1.8	3.4	2.6	105	30/06/2009
1.5	2.3	1.6	1.0	106	02/07/2009
0.4	2.3	2.6	0.9	107	07/07/2009
3.8	1.4	2.3	1.8	108	09/07/2009
2.4	3.0	2.0	1.1	109	14/07/2009
1.0	2.5	2.2	0.8	110	17/07/2009
2.4	1.0	2.8	3.7	111	22/07/2009
2.7	2.5	2.3	2.0	112	10/08/2009
0.0	3.4	2.0	2.6	113	18/08/2009
1.6	1.8	2.2	3.6	114	20/08/2009
1.7	1.0	0.0	3.5	115	25/08/2009
3.0	2.7	2.0	1.6	116	01/09/2009
3.8	2.3	3.4	1.8	117	07/09/2009
0.0	2.1	1.2	1.2	118	09/09/2009
2.8	1.1	2.1	2.7	119	14/09/2009
1.9	3.1	1.4	1.4	120	17/09/2009
2.4	3.4	1.6	0.7	121	22/09/2009
2.9	3.8	1.6	2.3	122	24/09/2009
1.5	3.9	3.5	2.5	123	30/09/2009
2.0	1.0	3.3	2.2	124	01/10/2009
2.1	1.2	3.3	3.7	125	06/10/2009

Antes de pasar al análisis estadístico de la muestra veamos un box-plot comparando los diferentes puntos de medida, además de un histograma de cada uno de los puntos.

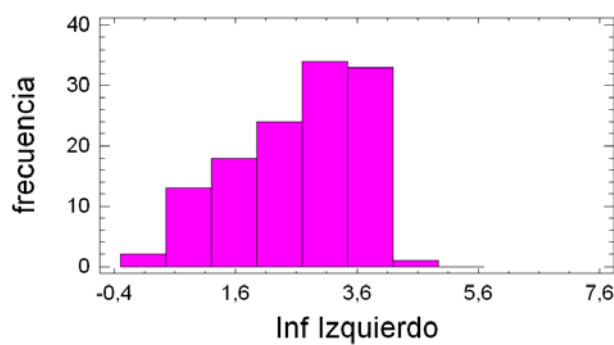
Gráfico de Cajas y Bigotes



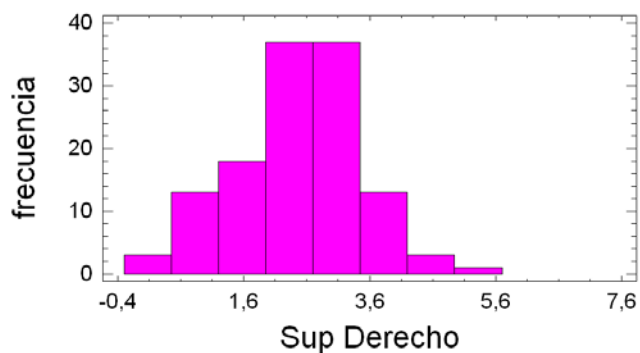
Histograma



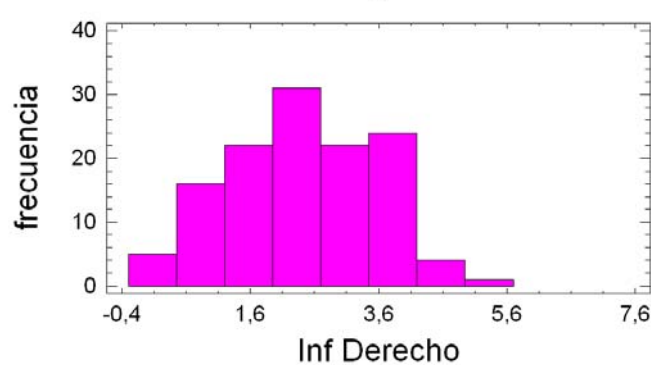
Histograma



Histograma



Histograma





Tal y como se puede observar el punto Sup. Izquierdo tiene una media más baja que el resto. El punto Inf. Izquierdo es el que tiene la media mas alta y es destacable que tenga la mayor dispersión de las 4 muestras, además es el que tiene una distribución menos normal.

Estos 4 puntos son independientes, la correlación muestral es inferior a 0,1 en valor absoluto.



Capítulo 5. **ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

5.1. METODOS ESTADÍSTICOS

A continuación vamos a estudiar los 2 métodos estadísticos que hemos utilizado en este proyecto para realizar el análisis y llegar a las posteriores conclusiones

5.1.1. ANÁLISIS DE LA VARIANZA (ANOVA)

En la investigación empírica es muy frecuente que, repitiendo un experimento en condiciones indistinguibles para el investigador, los resultados obtenidos presenten variabilidad. Esta variabilidad (error experimental) suele ser pequeña en un laboratorio, pero en una planta industrial las diferencias de rendimiento entre lotes de características análogas pueden llegar a ser del 20 por ciento. Por otra parte, si mediante experimentación ordenamos en magnitud los efectos de posibles ajustes para mejorar un proceso, hay ciertas variables (factores) que producen cambios muy importantes en el resultado de dicho proceso a las que denominamos variables influyentes y que deben ser rápidamente identificadas, además de cuantificado el grado de su influencia.

Teóricamente es posible dividir la variabilidad del resultado de un experimento en dos partes: la originada por los factores que influyen directamente en el resultado del experimento, estudiados en sus distintos niveles o tratamientos, y la producida por el resto de los factores con influencia en el resultado del experimento desconocida o no controlable, que se conoce con el nombre de error experimental. Los factores, estudiados en sus distintos niveles, influyen sobre una variable respuesta que mide el resultado del experimento. Dentro de cada nivel de factor analizamos una serie de observaciones del experimento en control (unidades experimentales) y su efecto sobre la variable respuesta, es decir, puede repetirse el experimento varias veces para cada nivel (replicación).

La metodología del análisis de la varianza (ANOVA) estudia cómo realizar comparaciones lo más homogéneas posibles, para aumentar la probabilidad de detectar cambios o identificar factores o variables influyentes en el proceso. Comprobar si un tratamiento mejora un proceso requiere comparar los resultados antes y después de aplicarlo. Cuando exista mucha variabilidad entre los resultados o, en otros términos, un gran error experimental, sólo detectaremos como influyentes aquellos tratamientos que

produzcan cambios muy grandes en el resultado del proceso con relación al error experimental.

5.1.1.1 ANÁLISIS DE LA VARIANZA DE UN FACTOR

El modelo unifactorial se presenta cuando tenemos un solo factor, estudiado en sus distintos niveles, que influye sobre una variable respuesta que mide el resultado del experimento, y el resto de los factores forman el error experimental influyendo sobre la variable respuesta de forma no controlable. Supongamos que el factor se presenta con T niveles.

Sea X_{ij} la observación j -ésima de la variable respuesta relativa al i -ésimo nivel de factor (resultado obtenido para la variable respuesta en la repetición j -ésima del experimento para el i -ésimo nivel de factor). Para cada nivel i de factor se repite el experimento n_i veces para recoger el efecto del error experimental. Representamos por μ_i la parte de X_{ij} debida a la acción del nivel i -ésimo de factor (en este caso un único factor). Representamos por ϵ_{ij} la variación causada por todos los factores no controlables (error experimental).

Entonces podemos modelar X_{ij} de la siguiente forma $X_{ij} = \mu_i + \epsilon_{ij}$ con i variando desde 1 hasta I , y j variando desde 1 hasta n_i .

Si hubiese dos factores conocidos e independientes que actuaran sobre la variable respuesta X_{ij} , el modelo sería de dos factores, y al generalizar a múltiples factores tenemos el modelo multifactorial.

Un modelo es de efectos fijos cuando los resultados obtenidos sólo son válidos para esos determinados niveles de factor estudiados en el momento actual (factores constantes). Lo que ocurra a otros niveles de factor puede ser diferente. Un modelo es de efectos aleatorios cuando los resultados obtenidos son válidos, sean cuales sean los niveles de factor empleados. Los factores son aleatorios (factores variables aleatorias) y los niveles estudiados de factor son una muestra de la población de niveles, que se supone infinita. Un modelo mixto presenta efectos fijos y aleatorios a la vez.

Un modelo es replicado si el experimento se repite varias veces para cada nivel de factor. En caso contrario se dice que tenemos un modelo con una unidad por casilla.

Un modelo se llama equilibrado (balanced) cuando todos los n_i son iguales para cada nivel de factor i , es decir, que el número de observaciones para cada nivel de factor es siempre el mismo (el experimento se repite para cada nivel de factor el mismo número de veces). En caso contrario se llama no equilibrado (unbalanced).

5.1.1.2 MODELOS MULTIFACTORIALES

Estos modelos se presentan cuando dos o más factores (variables independientes) afectan a la variable respuesta (variable dependiente). Para cada factor tendremos varios niveles, que dividen la población total en grupos de tratamiento. En la terminología del diseño de experimentos suelen denominarse tratamientos los distintos niveles de cada factor. Un concepto importante a tener en cuenta en el modelo multifactorial de la variarla es el análisis de la interacción entre las variables (factores). Se dice que hay interacción entre A y B cuando la variable independiente A afecta a la variable dependiente de manera distinta según los diferentes niveles de otra variable independiente B. En síntesis se trata, por tanto, de analizar si las variables independientes (factores) producen efectos distintos en función de los niveles de las otras variables independientes.

5.1.2. CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS

El control estadístico de procesos tiene como principales beneficios:

- Al vigilar continuamente el funcionamiento del proceso reduce la fabricación de productos defectuosos.
- El control de producto terminado tiene poca capacidad de generar información útil para ajustar y mejorar el proceso. Mediante el control estadístico de proceso podemos saber en que momento se empezó a desajustar el proceso, por lo que se puede analizar las circunstancias que llevaron al desajuste para que no vuelvan a ocurrir.

La herramienta más utilizada dentro del control estadístico de procesos son los gráficos de control.

Los gráficos de control los podemos clasificar:

1. Gráficos de control por variables.

2. Gráficos de control por atributos.
3. Gráficos de control por el número de defectos.

Causas de variabilidad de un proceso

Uno de los axiomas fundamentales de fabricación es que nunca dos objetos pueden fabricarse exactamente iguales, producimos con cierta variabilidad.

Cada proceso está sujeto a la influencia de muchos factores (muchos de los cuales no podemos controlara) y por lo tanto, hay variabilidad en el resultado final del proceso.

En la práctica siempre habrá factores que no podremos controlar, por lo que el producto final tendrá una calidad variable. Por tanto, cuando se habla de controlar la calidad nos estamos refiriendo a controlar la variabilidad de esa calidad. Aunque no se puede dar una relación exhaustiva de las causas que provocan la variabilidad, es interesante hacer una clasificación entre causas asignables a factores concretos (y controlables) y causas no asignables. No obstante, la frontera entre ambas no estará, en general, perfectamente definida.

1. **Causas no assignable o naturales:** causas cuyos efectos individuales son pequeños y difíciles de eliminar, producen una variabilidad estable y predecible, por ejemplo:

- Proceso: la imprecisión de las herramientas, la vibración de las máquinas, fluctuaciones hidráulicas y eléctricas,...
- Materiales: cambios de materia prima, espesor, resistencia,...
- Ambiente: diferencias en las condiciones atmosféricas, limpieza, iluminación,...
- Personas: diferencia en el estado físico, experiencia, motivación,...

2. **Causas asignables:** causas que actúan en determinados momentos produciendo gran variabilidad, sus efectos son predecibles y definidos. Sus efectos son eliminados cuando se elimina la causa, por ejemplo:

- Desajuste de la máquina
- Defecto de la materia prima

- Operario no cualificado

El control estadístico de procesos consiste en observar periódicamente el proceso y descubrir mediante gráficos cuando en el proceso están actuando causas asignables, con objeto de descubrirlas y eliminarlas del proceso.

Cuando en el proceso sólo actúan causas no asignables se dice que el proceso está bajo control. (Cuando en el proceso actúan causas asignables se dice que el proceso está fuera de control)

5.1.1.2 GRÁFICOS DE CONTROL CON MEMORIA

Existen muchos tipos de gráficos que son utilizados también en el control estadístico de procesos como por ejemplo el X-bar pero el problema que tienen ante pequeños cambios es que tardan mucho tiempo en detectar el desajuste. Los gráficos de control con memoria son más apropiados detectar pequeños desajustes con más rapidez. Por contra, son menos apropiados para detectar desajustes grandes, por lo que son complementarios, y no sustitutivos, de los otros de gráficos de control.

La idea de los gráficos de control que se presentan en este tema es que la representación gráfica no se basa en las observaciones individuales, o promedios de una muestra de ellas, sino en la acumulación de información. Por esta razón se les denominan gráficos con memoria.

GRÁFICOS CUSUM

Un gráfico de sumas acumuladas muestra las sumas acumuladas de las desviaciones de cada valor muestral con respecto al valor objetivo. El gráfico puede estar basado en medias muestrales o en observaciones individuales.

Cuando estamos trabajando con procesos bajo control, los diagramas CUSUM son buenos para detectar cambios con respecto al objetivo ya que dichos gráficos incorporan información procedente de la secuencia de valores muestrales. Los puntos que representamos son las sumas acumuladas de las desviaciones de los valores muestrales con respecto al objetivo. Dichos puntos deberían fluctuar de forma aleatoria alrededor del cero. Si detectamos una tendencia, ya sea hacia arriba o hacia abajo, ésta debería ser considerada como una evidencia de que la media muestral se ha desplazado.

Es posible representar dos tipos de gráficos CUSUM: el diagrama por defecto representa dos CUSUM unilaterales. El CUSUM superior detecta desviaciones hacia arriba en el nivel del proceso, el CUSUM inferior detecta desviaciones hacia abajo. Este tipo de gráfico utiliza límites de control para determinar cuando estamos ante un proceso fuera de control.

Los gráficos CUSUM vienen definidos por dos parámetros, H y K:

- H representa el número de desviaciones estándar entre la línea central y los límites de control.
- K representa el tamaño del posible desplazamiento que queremos detectar.

5.2. ANALISIS ESTADÍSTICO

5.2.1. ANOVA UNIFACTORIAL

Viendo la tabla de holguras obtenidas en la toma de datos vamos a analizar la varianza de cada uno de los factores que hemos considerado a la hora de la toma de datos, tales como Lado, Posición, Punto de Medida y N° de Avión.

Para cada uno de los factores anteriormente mencionados realizaremos primero la tabla ANOVA que contrasta la hipótesis de igualdad de medias y posteriormente realizaremos un gráfico de medias mediante el método LSD (Least Significant Difference) en el que representamos la holgura media para cada factor.

- Lado

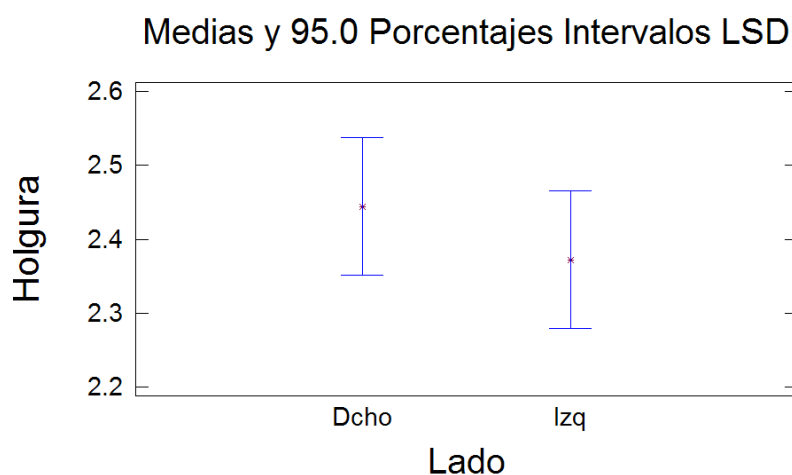
Como hemos visto anteriormente en la toma de datos, la medida de estos se realiza en la unión de los cajones laterales (izquierdo y derecho) con el cajón central. En el factor “Lado” se engloban todas las observaciones diferenciando las que se han tomado en el lado Izquierdo de las tomadas en el lado Derecho.

Veamos ahora los resultados de la tabla ANOVA:

Análisis de la Varianza					
Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	0.64082	1	0.64082	0.57	0.4494
Intra grupos	556.916	498	1.1183		
Total (Corr.)	557.556	499			

Esta tabla contrasta la hipótesis de que la holgura media es la misma en cada lado, veamos ahora el gráfico de medias que permite interpretar si hay solapamientos como que la media de ambos grupos puede ser la misma.

Veamos ahora el gráfico de medias:



Conclusión: observando los valores obtenidos en la tabla ANOVA determinamos que el factor Lado no es significativo. Viendo el gráfico de medias no podemos rechazar que en ambos lados la holgura media es la misma.

➤ Posición

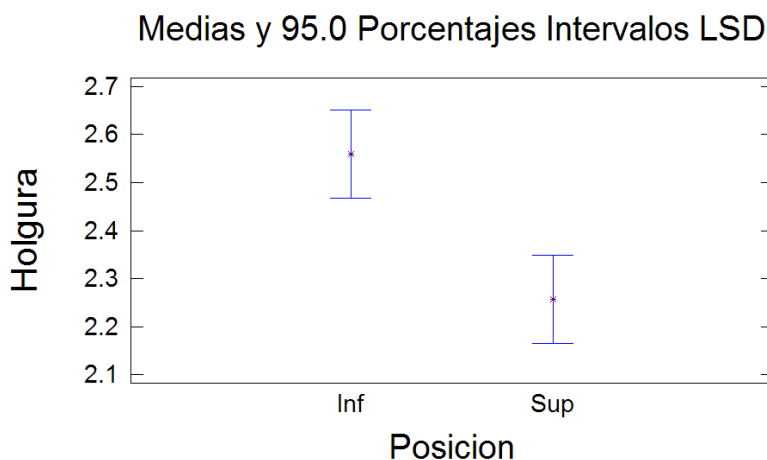
Haciendo referencia de nuevo a la toma de datos, recordamos que cuando realizamos la media de la holgura, esta se realiza en la parte inferior y en la parte superior. Estos son los datos que están englobados dentro del factor “Posición”

Veamos ahora los resultados de la tabla ANOVA:

Tabla ANOVA para Holgura según Posicion

Análisis de la Varianza					
Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	11.4005	1	11.4005	10.40	0.0013
Intra grupos	546.156	498	1.0967		
Total (Corr.)	557.556	499			

Veamos ahora el gráfico de medias:



Conclusión: en vista de los resultados obtenidos calculando el ANOVA simple para el factor Posición determinamos que no podemos descartar que el factor Posición sea un valor significativo ya que el p-valor es menor que 0.05. El gráfico además evidencia que la holgura media en la posición inferior es mayor que en la posición superior.

➤ Punto de Medida

El factor “Punto de Medida” engloba todas las observaciones distinguiéndolas en 4 puntos según su posición de medida, tales como:

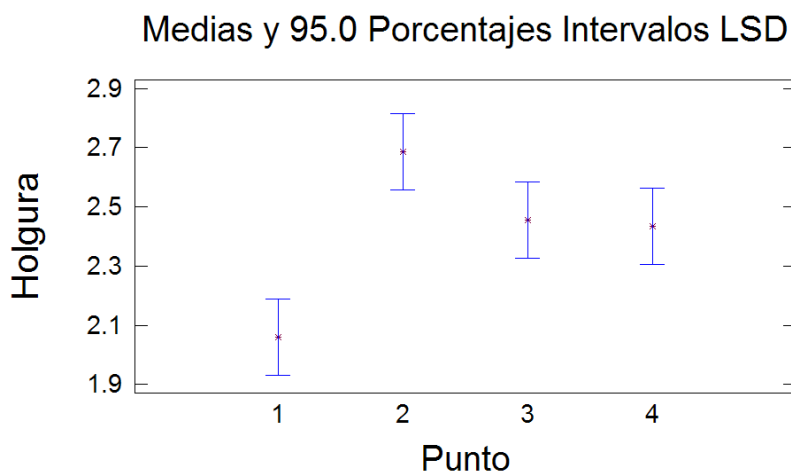
- 1 – Superior Izquierdo
- 2 – Inferior Izquierdo
- 3 – Superior Derecho
- 4 – Inferior Derecho

Veamos ahora los resultados de la tabla ANOVA:

Tabla ANOVA para Holgura según Punto

Análisis de la Varianza					
Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	25.0663	3	8.35543	7.78	0.0000
Intra grupos	532.49	496	1.07357		
Total (Corr.)	557.556	499			

Veamos ahora el gráfico de medias:



Conclusión: ya que el p-valor es menor que 0.05 determinamos que el factor Punto es significativo. Viendo el gráfico observamos que en el punto 1 la holgura media es significativamente menor que en el resto de los puntos. Además vemos que la diferencia entre el punto 1 y el 2 es muy acusada.

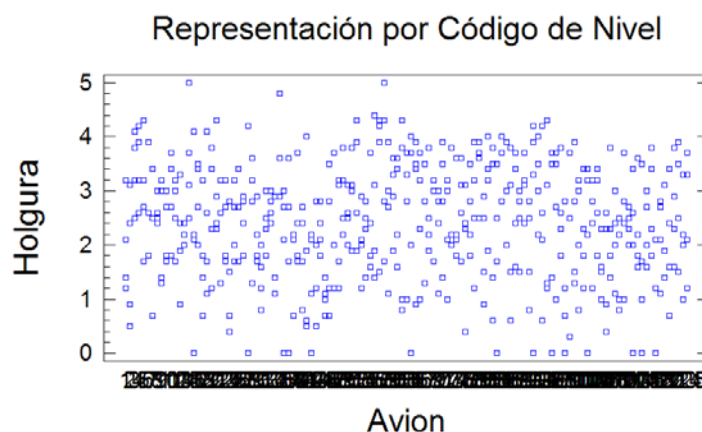
➤ N° Avión

El factor “N° Avión” engloba las medidas tomadas en los 125 aviones.

Veamos ahora los resultados de la tabla ANOVA:

Tabla ANOVA para Holgura según Avion

Análisis de la Varianza					
Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	138.394	124	1.11608	1.00	0.4943
Intra grupos	419.163	375	1.11777		
Total (Corr.)	557.556	499			



Conclusiones: como vemos en la tabla ANOVA el p-valor es mayor que 0.05 con lo que podemos rechazar que el factor N° Avión sea significativo.

5.2.2. ANOVA MULTIFACTORIAL

Tal y como hemos visto en los análisis de *ANOVA unifactorial* anterior tiene mas sentido analizar los datos de las holguras con un *ANOVA multifactorial*. Tomaremos ahora los factores “Lado”, “Posición” y “Avión” y veremos que conclusiones podemos obtener con un orden de interacción 2.

Análisis de la Varianza paraHolgura - Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
EFECTOS PRINCIPALES					
A:Lado	0.64082	1	0.64082	0.55	0.4607
B:Posicion	11.4005	1	11.4005	9.74	0.0022
C:Avion	138.394	124	1.11608	0.95	0.6034
INTERACCIONES					
AB	13.025	1	13.025	11.13	0.0011
AC	132.587	124	1.06925	0.91	0.6916
BC	116.427	124	0.938927	0.80	0.8890
RESIDUOS	145.083	124	1.17002		
TOTAL (CORREGIDO)	557.556	499			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

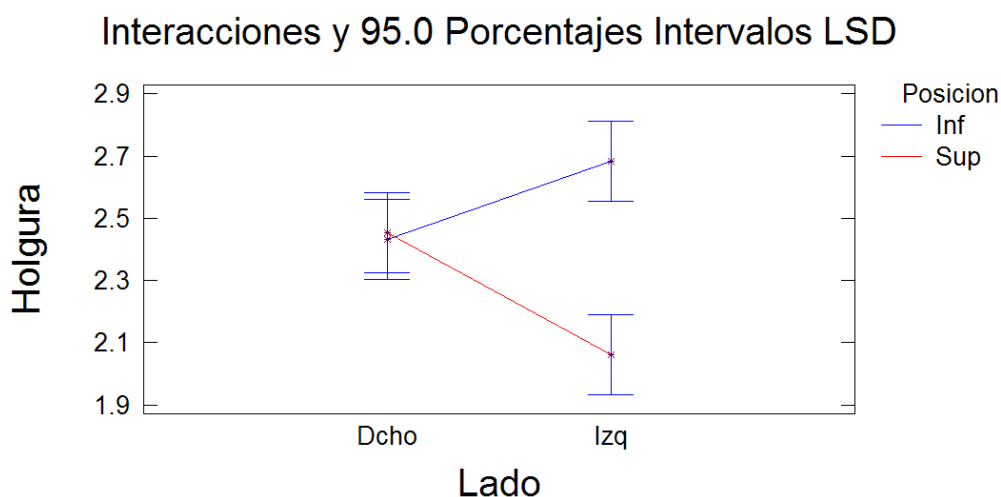
Tal y como podemos observar de los valores obtenidos de la tabla ANOVA hemos detectado que el efecto de las interacciones entre los distintos niveles de los factores “Posición” y “Lado” son significativas, no siéndolo el resto de interacciones (aquellas en las que aparece el factor “Avión”) con lo que eliminaremos el factor “Avión” y veremos que obtenemos quedándonos con los factores significativos.

Análisis de la Varianza para Holgura - Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
EFECTOS PRINCIPALES					
A:Lado	0.64082	1	0.64082	0.60	0.4401
B:Posicion	11.4005	1	11.4005	10.62	0.0012
INTERACCIONES					
AB	13.025	1	13.025	12.13	0.0005
RESIDUOS	532.49	496	1.07357		
TOTAL (CORREGIDO)	557.556	499			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

En la tabla anterior puede verse que la interacción entre “Lado” y “Posición” es muy significativa. Los residuos tienen una varianza de 1.073, y por tanto una desviación típica estimada de 1.03.



Conclusiones: en el grafico anterior se observa como las diferencias entre las holguras del Lado Derecho al cambiar de posición no son significativas. Los intervalos de de confianza se solapan y por tanto en el lado Derecho no podemos descartar que las medias poblacionales sean iguales para las 2 posiciones (Superior e Inferior), sin embargo en el Lado Izquierdo se observan diferencias significativas cuando cambiamos de la posición Inferior a la Superior. Por lo tanto el efecto de la Posición en la variable respuesta (holgura) no es homogéneo en los 2 lados.

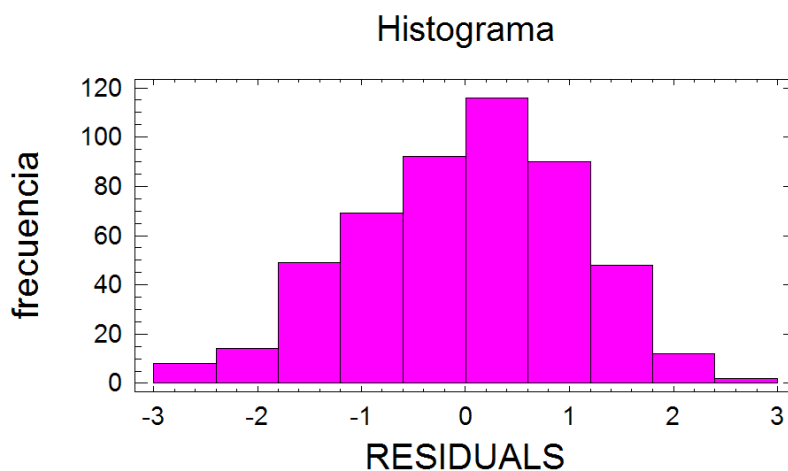
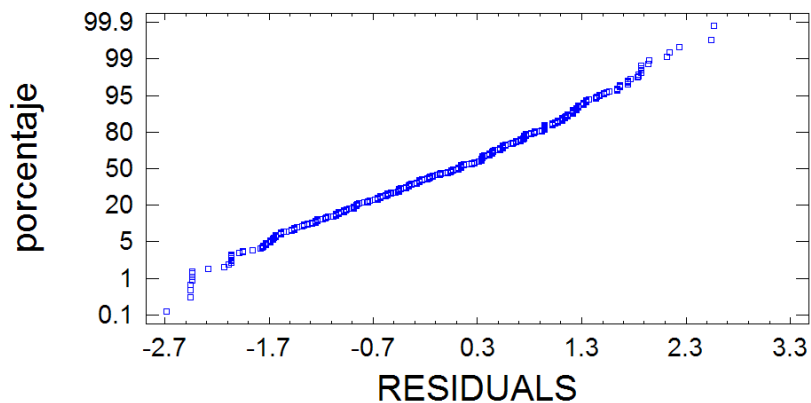
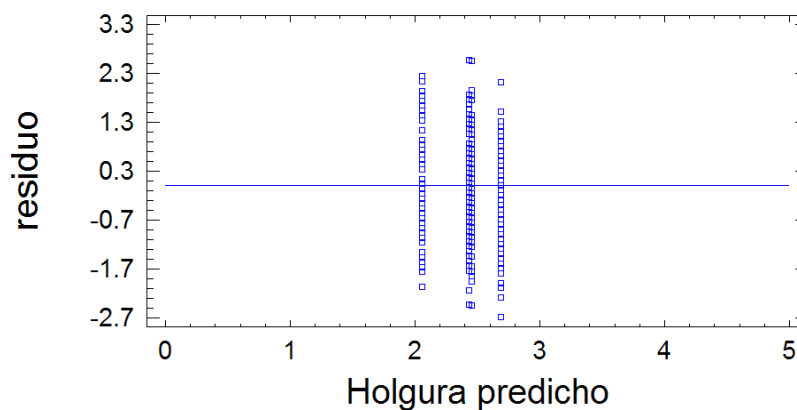


Gráfico de Probabilidad Normal



El histograma y el gráfico de probabilidad normal muestran que podemos asumir normalidad en el término de error, lo que es una propiedad deseable para validar los resultados del ANOVA. Para comprobar la homocedasticidad lo más útil es ver el gráfico de Residuos frente a valores predichos.

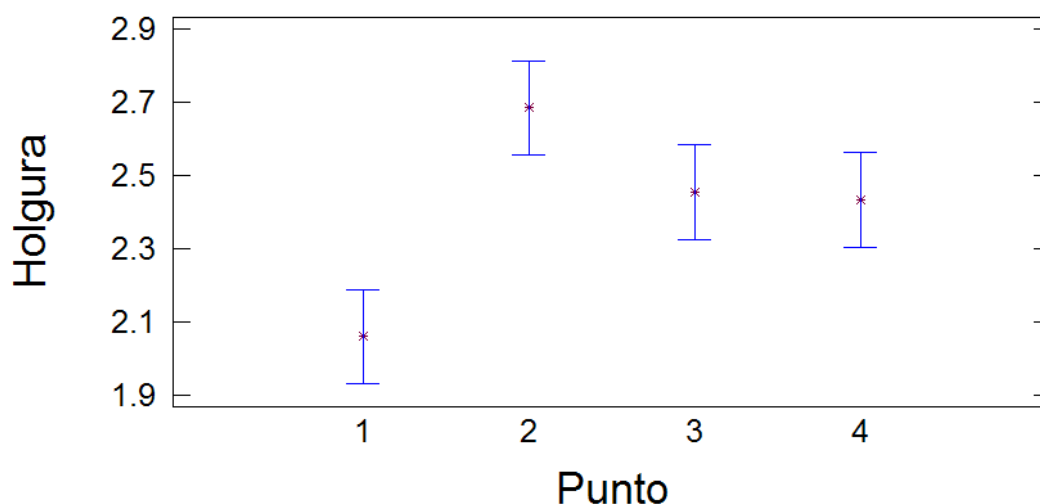
Gráfico de Residuos para Holgura



En este caso el gráfico de residuos frente a valores predichos no muestra heterocedasticidad. Para cada valor predicho, la varianza de los residuos parece similar.

Conclusiones: como resumen de los resultados tenemos el gráfico siguiente:

Medias y 95.0 Porcentajes Intervalos LSD



La figura anterior muestra que la diferencia de medias entre los diferentes puntos de medida es del orden de magnitud de 0.4-0.6 mm.

5.2.3 ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DEL PROCESO

De las conclusiones obtenidas en el ANOVA Multifactorial queremos saber si la diferencia existente en las medias es estructural o se debe a situaciones concretas que han producido un desajuste en la media, por ello vamos a realizar el gráfico de control para analizar la estabilidad de las medias de cada uno de los puntos.

Siendo los puntos de medida los siguientes:

- 1 – Superior Izquierdo
- 2 – Inferior Izquierdo
- 3 – Superior Derecho
- 4 – Inferior Derecho

Vamos a estudiar ahora la variación existente entre las medias de los diferentes puntos, además debido a que la desviación típica estimada del proceso es 1.03, un desajuste en la media de 0.4-0.6 mm equivale a un desajuste que corresponde aproximadamente a 0.5 desviaciones típicas (σ). Estamos por tanto interesados en detectar cambios en la media muy pequeños. Para analizar la estabilidad utilizamos las herramientas del control estadístico de procesos, en este caso vamos a utilizar un gráfico

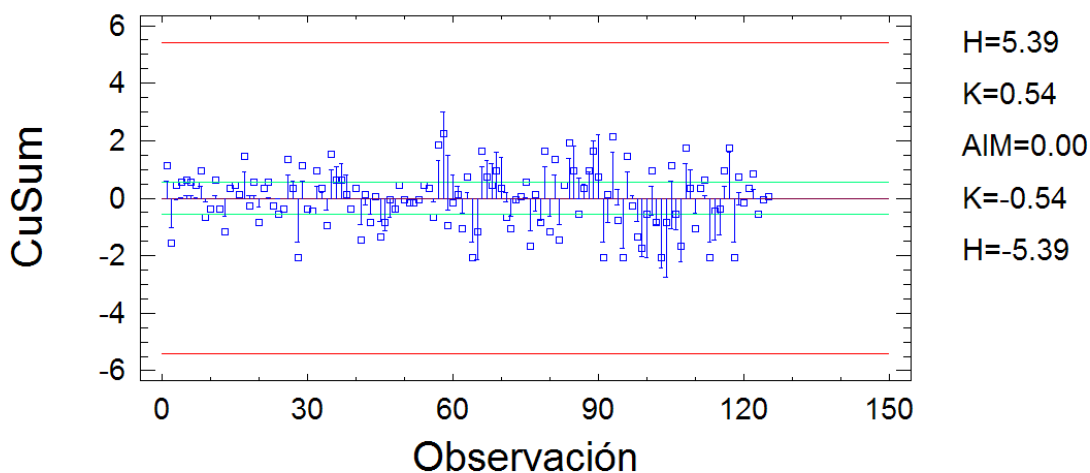
CuSum Individual (H-K), ya que maximiza la probabilidad de detectar un desajuste en la medida de magnitud 0.5σ ó 1σ según elijamos, en lugar de un gráfico X-bar que es menos eficiente en la detección de cambios pequeños.

El procedimiento empleado para estudiar la estabilidad de los diferentes puntos es el siguiente:

- Representamos el gráfico CuSum para el punto correspondiente, viendo si el proceso ha sido estable y no hay valores que se encuentren fuera de los límites de control.
- Si el proceso es estable concluiremos el estudio de ese punto, dejando constancia de cuál es la media y la desviación típica estimadas de ese proceso para el posterior estudio.
- Si el proceso no es estable entonces la media y desviación típica estimadas no son válidas para hacer el gráfico, habrá que localizar periodos en los que haya estabilidad seleccionando un subconjunto de datos inicial estable y utilizando sus parámetros para graficar el resto de observaciones. De esta manera será más fácil detectar en que momento se han producido variaciones en la media.
- Finalmente compararemos los datos con los que nos hemos quedado para estudiar la estabilidad y los datos que hemos eliminado y veremos si estos últimos tienen a su vez una media estable.

1) SUPERIOR IZQUIERDO

Gráfico de Estado CuSum para Sup Izquierdo



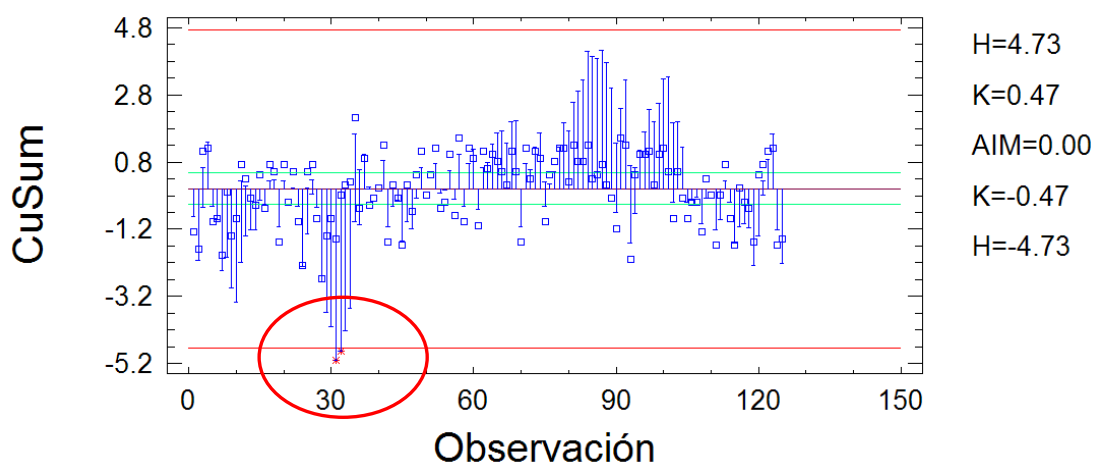
Conclusiones: podemos observar en el gráfico todos los valores se encuentran dentro de los límites de control. Los parámetros estimados para este punto son:

Media del Proceso = 2.06

Sigma del Proceso = 1.07884

2) INFERIOR IZQUIERDO

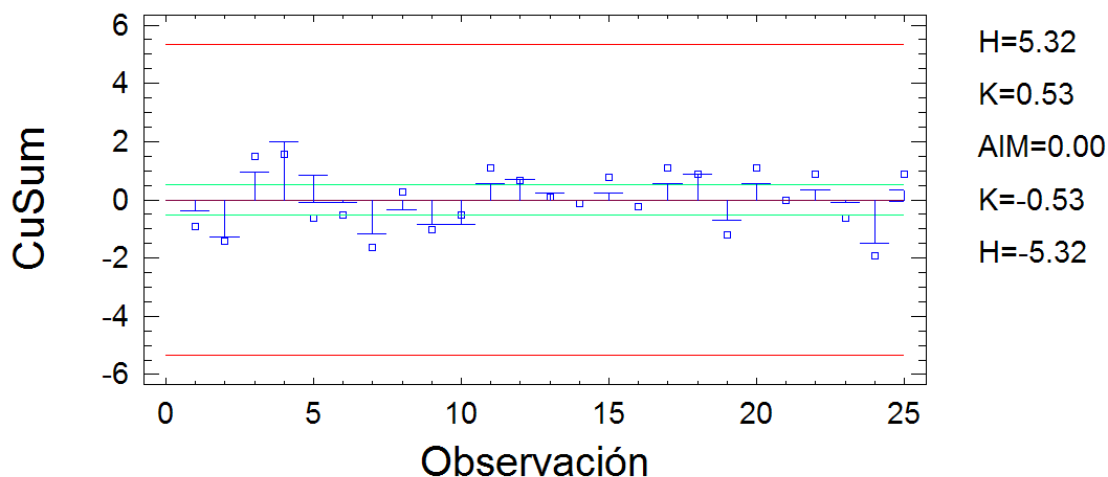
Gráfico de Estado CuSum para Inf Izquierdo



Como podemos observar en el gráfico CuSum utilizando todos los datos (125) hay un par de datos cerca de la observación número 30 que se salen de los límites lo que nos

obliga a estudiar solo los primeros 25 datos, donde parece que sí hay estabilidad (iremos probando hasta encontrar el punto exacto hasta el que podamos asumir estabilidad) para ver si pasa algo antes de esos puntos que provoque un cambio de tendencia.

Gráfico de Estado CuSum para Inf Izquierdo



Como podemos observar los 25 primeros datos están bastante controlados.

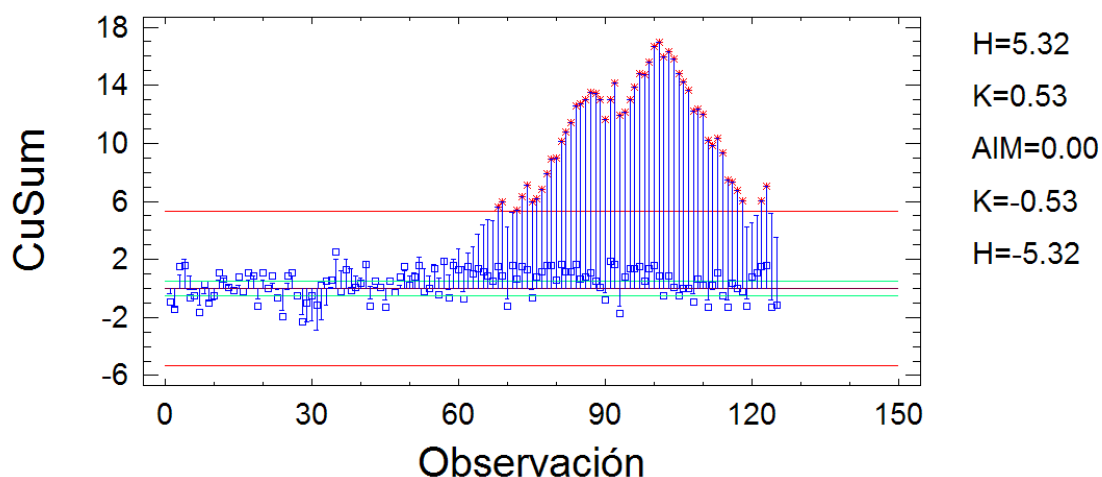
Los parámetros estimados para este punto son:

Media del Proceso = 2.32

Sigma del Proceso = 1.06383

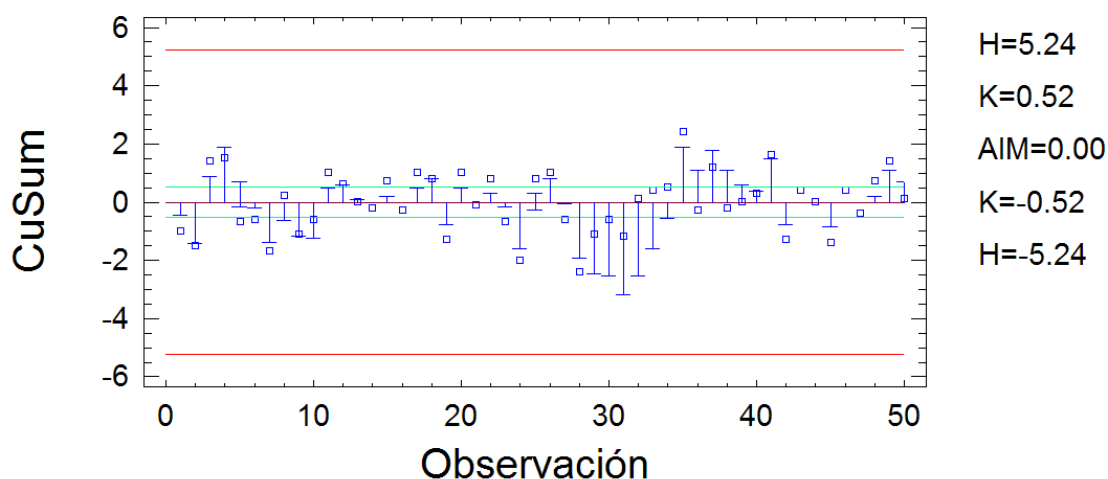
Tomaremos los valores de las estimaciones de la media y de sigma de este análisis y los utilizaremos para evaluar la estabilidad del total de los datos.

Gráfico de Estado CuSum para Inf Izquierdo



Como podemos observar en el gráfico hemos conseguido controlar esas 2 primeras observaciones pero ahora se nos salen todas las observaciones posteriores a la 65, así que voy a estudiar que pasa en las primeras 50.

Gráfico de Estado CuSum para Inf Izquierdo



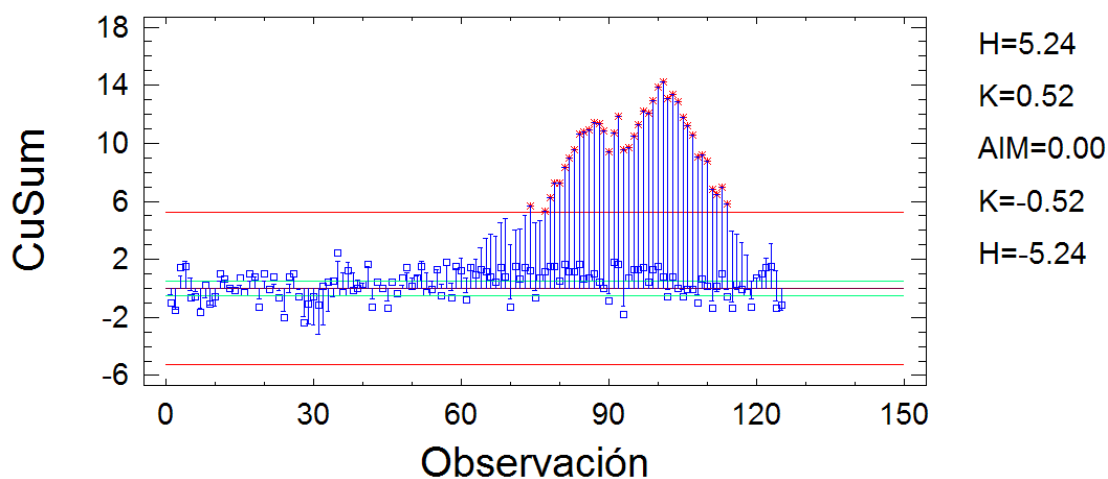
Los parámetros estimados para este punto son:

Media del Proceso = 2.38

Sigma del Proceso = 1.04755

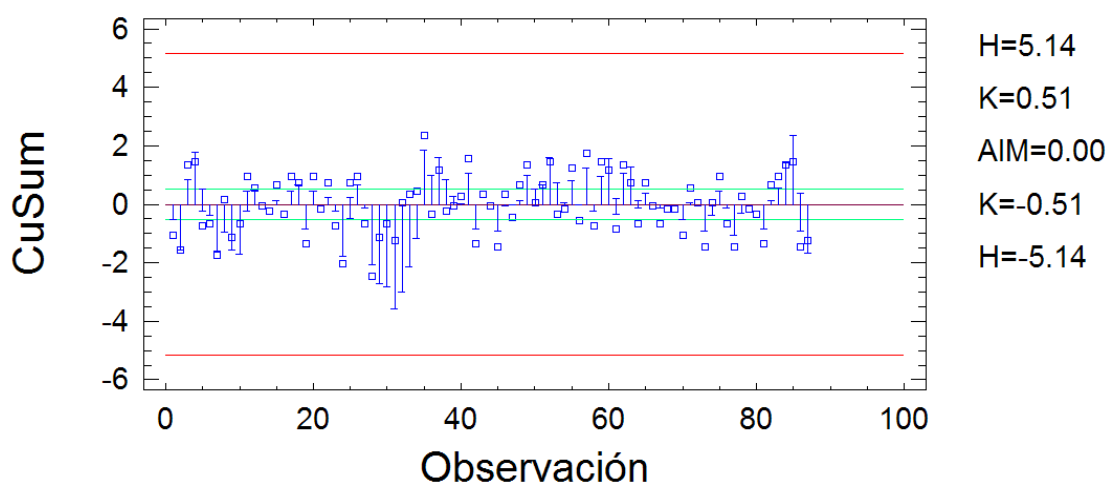
Observamos que todo está bastante estable así que tomamos los valores de las estimaciones de la media y de sigma de este análisis (primeros 50) y los utilizamos para intentar controlar el total de los datos. Este gráfico es:

Gráfico de Estado CuSum para Inf Izquierdo



Como podemos ver ahora tenemos los datos mas controlados aproximadamente hasta la observación 62 a partir de la cual parece que hay una tendencia positiva que hace que el gráfico empiece a subir (empieza el desajuste) hasta la observación 100 que es donde el gráfico empieza a bajar (termina el desajuste). Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores vamos a eliminar los datos inestables (desde la observación 63 hasta la 100) y realizaremos un estudio nuevo sin ellos.

Gráfico de Estado CuSum para II Reducido



Los parámetros estimados para este punto son:

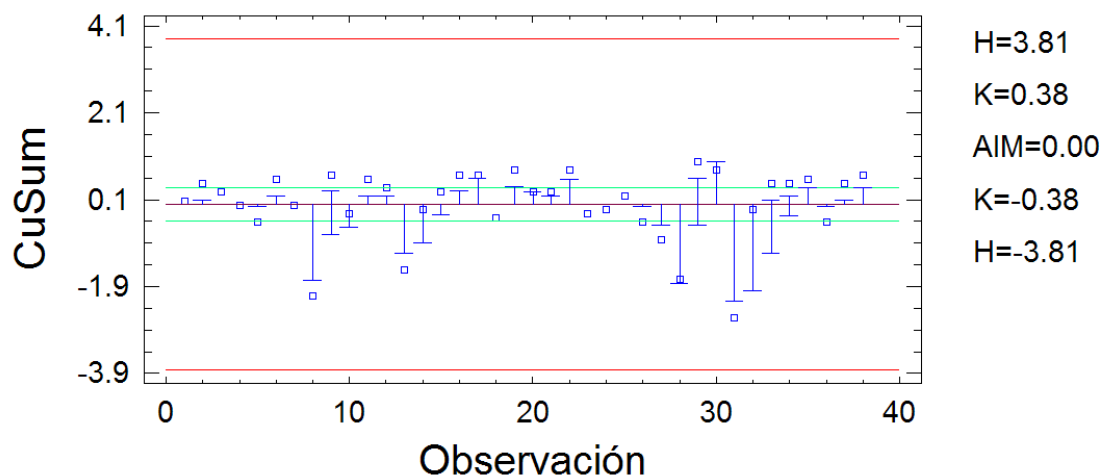
Media del Proceso = 2.44828

Sigma del Proceso = 1.02878

Tal y como podemos apreciar en el nuevo gráfico los datos ahora están controlados.

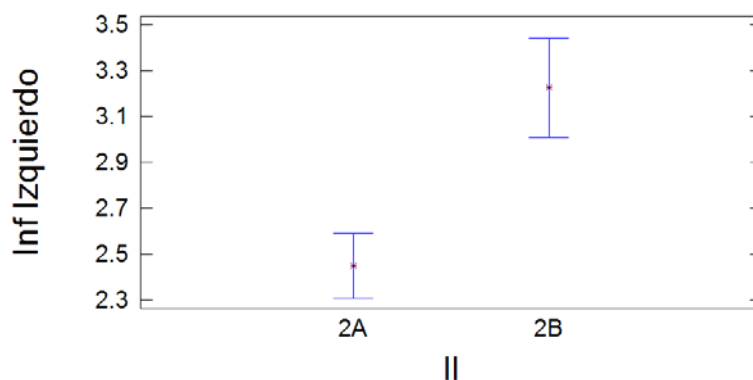
Veamos si los valores que hemos eliminado son estables.

Gráfico de Estado CuSum para II Eliminado



Como podemos observar los datos están controlados, así que vamos a representar ahora el ANOVA con los valores que hemos utilizado el estudio de la estabilidad de la muestra (2A: observaciones 1-62 y 101-125) y los valores que hemos eliminado (2B: observaciones 63-100).

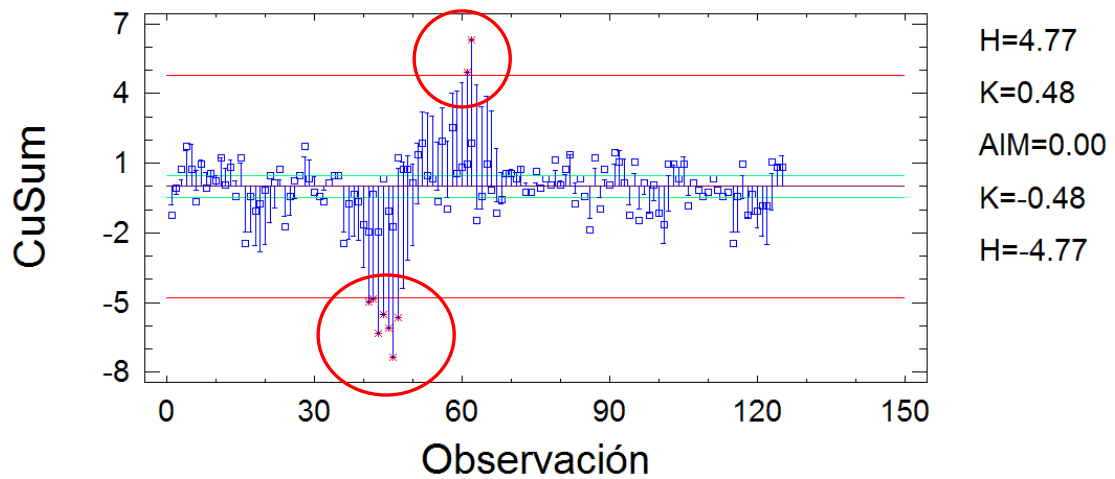
Medias y 95.0 Porcentajes Intervalos LSD



Conclusiones: podemos apreciar existe una gran diferencia en media entre las muestras 2A y 2B lo que nos confirma que los datos que hemos elegido para la muestra 2A son más representativos del proceso que nos gustaría tener, pues corresponden a un periodo donde hemos sido capaces de conseguir una menor holgura de forma sostenida.

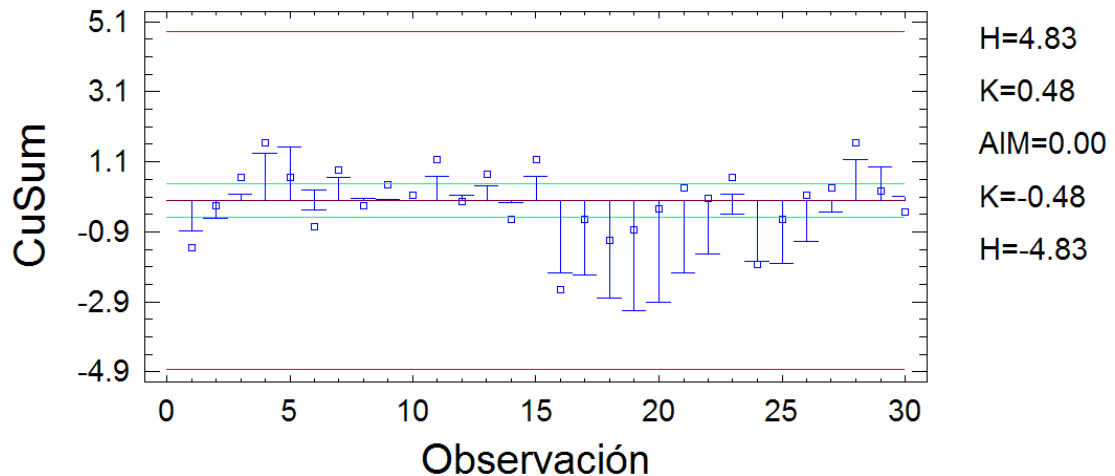
3) SUPERIOR DERECHO

Gráfico de Estado CuSum para Sup Derecho



Como podemos observar en el gráfico tenemos 2 zonas de datos que se encuentran fuera de los rangos de control. Voy a observar la tendencia que hay en los primeros 30.

Gráfico de Estado CuSum para Sup Derecho



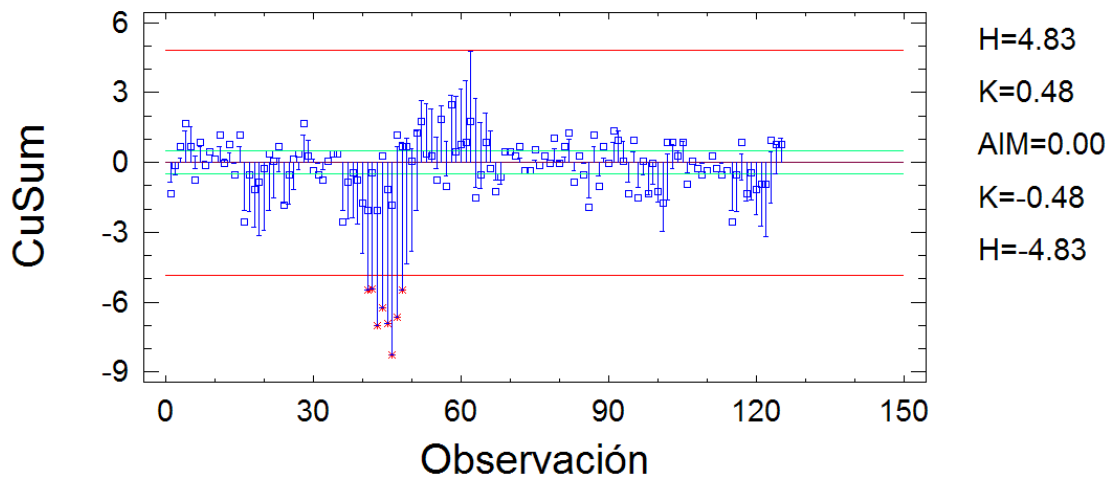
Los parámetros estimados para este punto son:

Media del Proceso = 2.54333

Sigma del Proceso = 0.966006

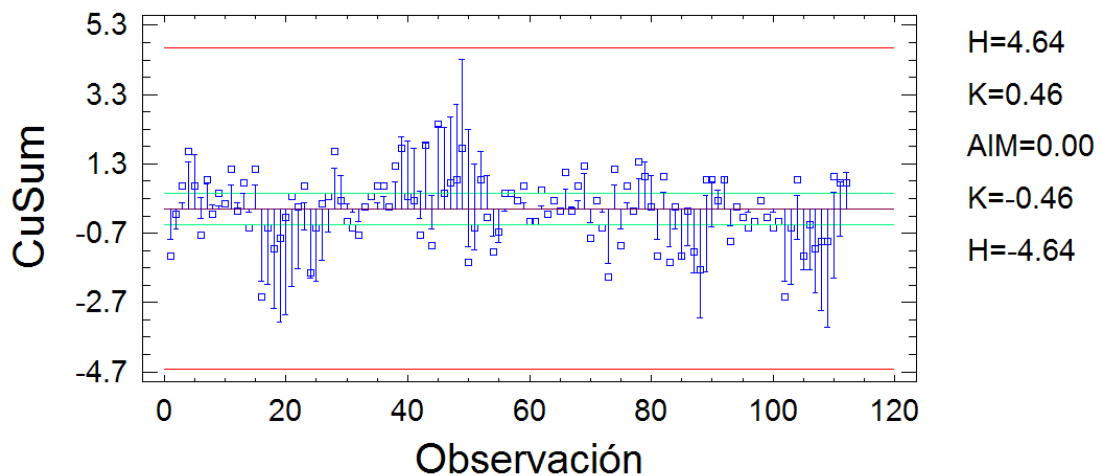
Veamos ahora si con los valores estimados de la media y sigma podemos mejorar el gráfico CuSum de todos los datos.

Gráfico de Estado CuSum para Sup Derecho



Como podemos apreciar por el gráfico obtenido existe una tendencia negativa que empezaría aproximadamente en la observación 35 y acabaría en la 47. Esto significa que sobre la observación 35 podría haberse producido una disminución significativa, aunque pequeña, de la holgura media, así que vamos a proceder a eliminar estos datos y ver que gráfico obtenemos después.

Gráfico de Estado CuSum para SD Reducido



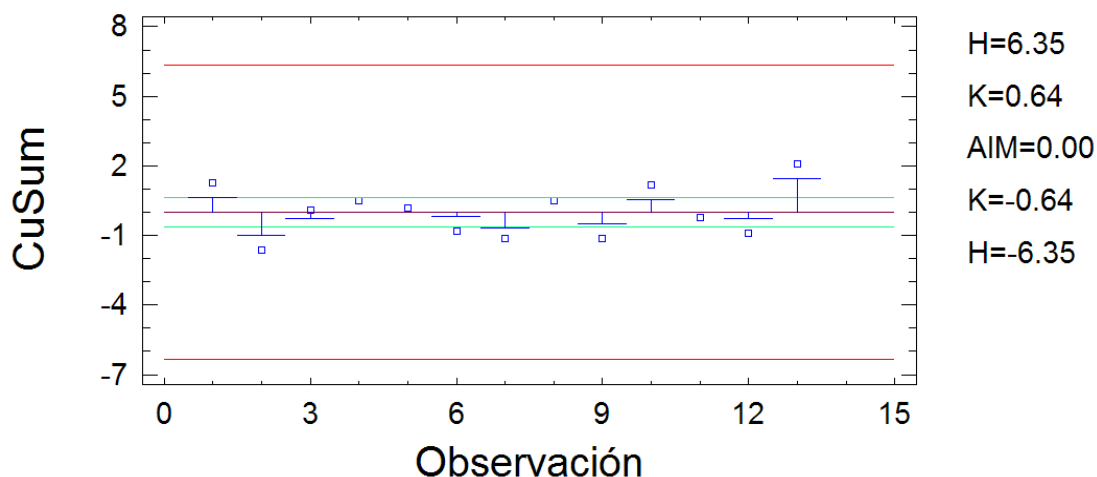
Los parámetros estimados para este punto son:

Media del Proceso = 2.55179

Sigma del Proceso = 0.927257

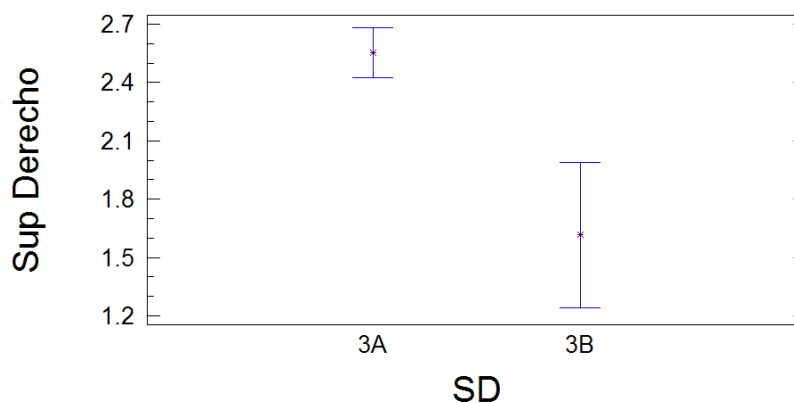
Podemos observar ahora que habiendo eliminado los valores citados anteriormente obtenemos un CuSum con todos los valores dentro de los límites de control. Veamos si los valores que hemos eliminado son estables.

Gráfico de Estado CuSum para SD Eliminado



Como podemos observar los datos están controlados, así que vamos ahora a representar ahora el ANOVA con los valores que hemos utilizado el estudio de la estabilidad de la muestra (3A: observaciones 1-34 y 48-125) y los valores que hemos eliminado (3B: observaciones 35-47).

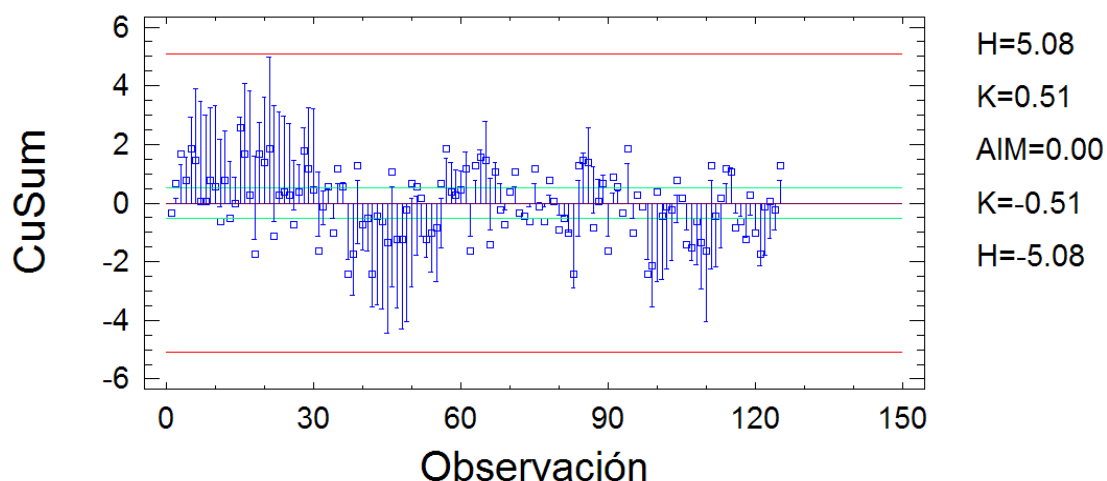
Medias y 95.0 Porcentajes Intervalos LSD



Conclusiones: podemos apreciar existe una gran diferencia en media entre las muestras 3A y 3B, además observamos que la muestra 3B tiene una media mucho menor que la 3A lo que nos lleva a pensar que los datos correctos son los 3B ya que presentan una menor holgura.

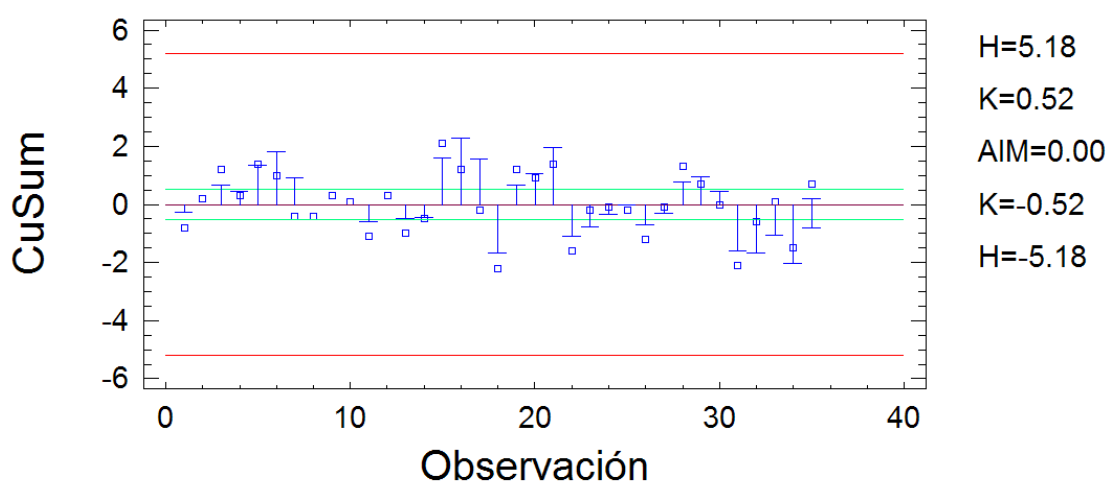
4) INFERIOR DERECHO

Gráfico de Estado CuSum para Inf Derecho



Como podemos observar en el gráfico CuSum que hemos obtenido estudiando el total de los datos del punto *Inferior Derecho* (125) no existe ningún punto que se encuentre fuera de los límites pero existe una tendencia positiva en los primeros 35 datos y una tendencia negativa en los 25 siguientes lo que nos lleva a pensar que no hay estabilidad en el proceso. Para analizar mejor esta estabilidad estimamos los parámetros (media y desviación típica) con las primeras 35 observaciones.

Gráfico de Estado CuSum para Inf Derecho



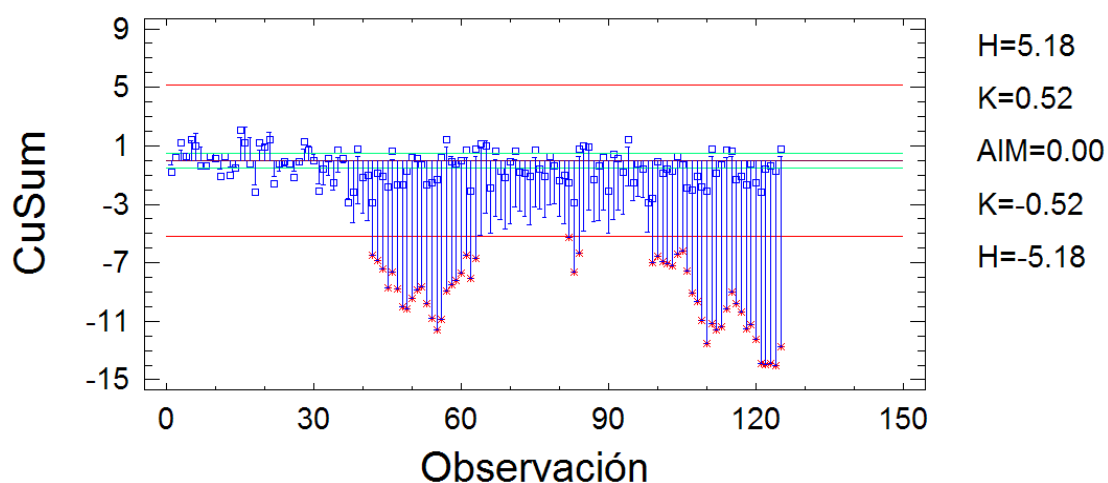
Tal y como vemos en el gráfico anterior parece que existe estabilidad así que utilizaremos estos valores estimados para el estudio del total de los datos.

Los parámetros estimados para este punto son:

Media del Proceso = 2.90571

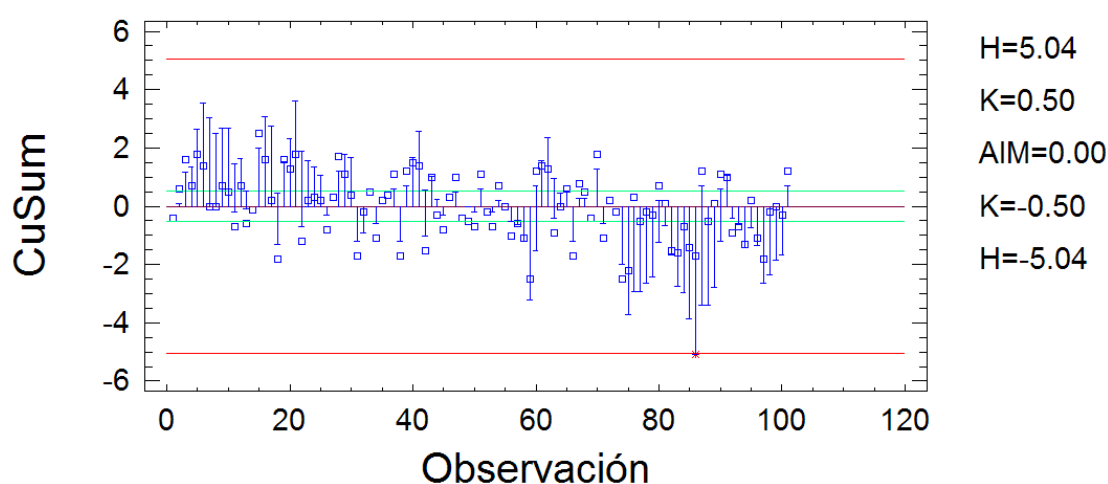
Sigma del Proceso = 1.03515

Gráfico de Estado CuSum para Inf Derecho



Como podemos observar hay 3 rangos de datos que se encuentran fuera de los límites de control, vemos además que cuando aparece el primer rango de datos existe una tendencia negativa que va desde la observación 35 a la 58 aproximadamente, así que vamos a proceder a eliminarlos para estudiar posteriormente como queda el gráfico sin ellos.

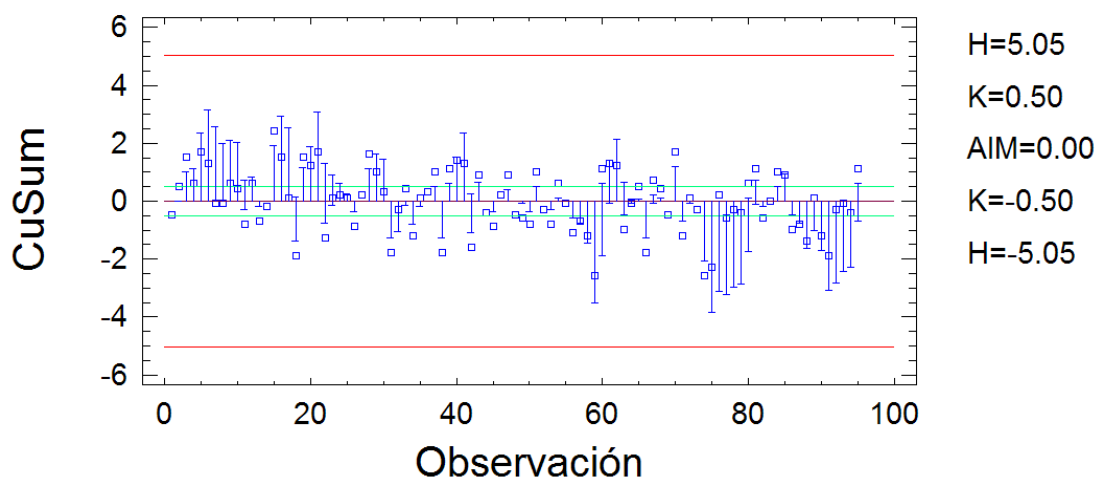
Gráfico de Estado CuSum para ID Reducido



Como podemos observar todavía tenemos una observación fuera de los límites con lo que vamos a proceder a eliminar el rango de observaciones que comprende de la 81 a

la 86 (este último es la observación que sale fuera de los límites de control) y veremos que gráfico obtenemos ahora.

Gráfico de Estado CuSum para ID Reducido



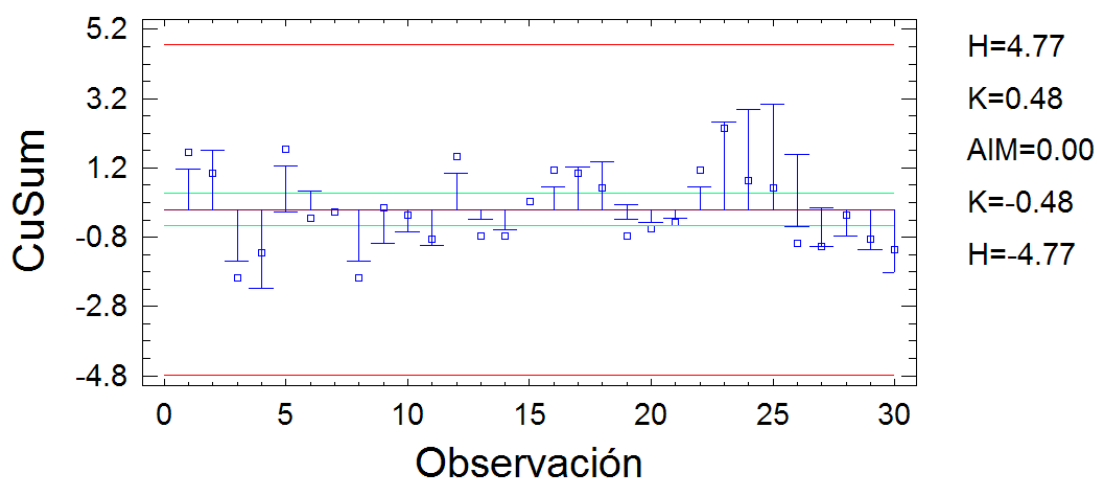
Los parámetros estimados para este punto son:

Media del Proceso = 2.58211

Sigma del Proceso = 1.00913

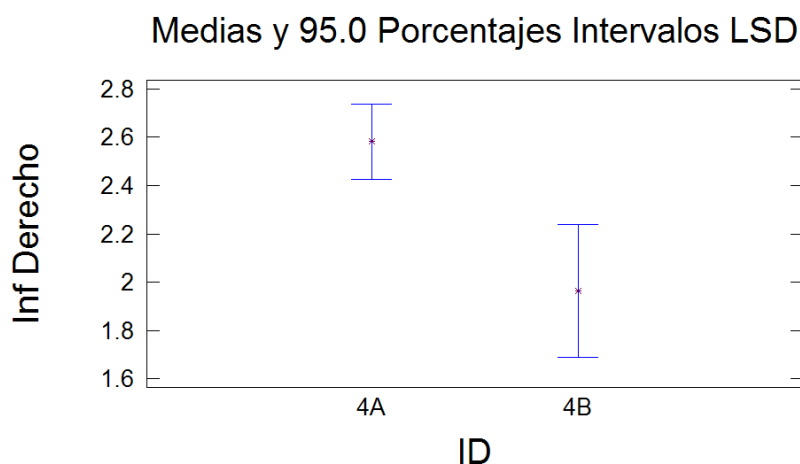
Podemos observar ahora que habiendo eliminado todos los valores citados anteriormente obtenemos un CuSum con todos los valores dentro de los límites de control. Veamos si los valores que hemos eliminado son estables.

Gráfico de Estado CuSum para ID Eliminado



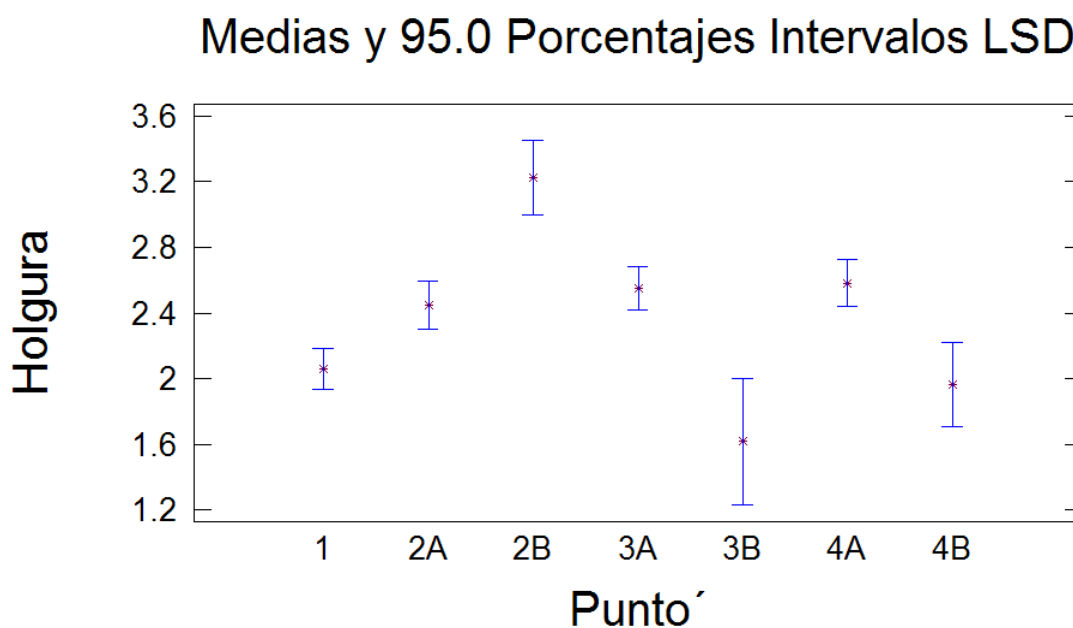
Como podemos observar los datos están controlados, así que vamos ahora a representar ahora el ANOVA con los valores que hemos utilizado el estudio de la

estabilidad de la muestra (4A: observaciones 1-34, 59-104 y 111-125) y los valores que hemos eliminado (4B: observaciones 35-58 y 105-110).



Conclusiones: podemos apreciar existe una gran diferencia en media entre las muestras 4A y 4B, además observamos que la muestra 4B tiene una media mucho menor que la 4ª (tal y como nos ocurría en el caso anterior, Superior Derecho) lo que nos lleva a pensar que los datos correctos son los 4B ya que presentan una menor holgura.

Finalmente representando el ANOVA con la variable punto' que engloba todos los análisis que hemos obtenido anteriormente tenemos el gráfico siguiente:



Resumen de Conclusiones: al observar el gráfico de medias final que engloba todos los análisis anteriores vemos que existen claramente diferenciados tres niveles de holguras, estos niveles corresponden a los periodos en los cuales se solapan las medias.

Tenemos un primer nivel de holguras (las más pequeñas) formado por los puntos 1, 3B y 4B, un segundo nivel (holguras medias) compuesto por los puntos 2A, 3A y 4A y finalmente un tercer nivel (holguras grandes) que esta compuesto únicamente por el punto 2B.

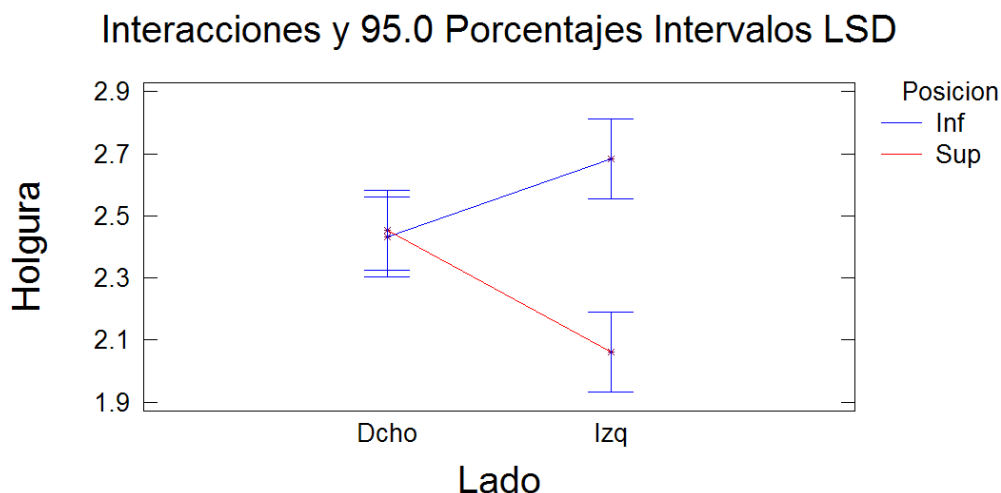
Podemos concluir entonces que las holguras no son algo que suceda de forma aleatoria en un rango amplio, parece que la forma de fabricar produce holguras clasificables en tres niveles: pequeñas, medianas y grandes. El objetivo a futuro es identificar por qué suceden, y así intentar que sean todas del tipo pequeño.



Capítulo 6. **CONCLUSIONES**

En este proyecto se han analizado las holguras existentes en el proceso de fabricación de un avión comercial para ello se han utilizado métodos estadísticos de los cuales se pueden obtener las siguientes conclusiones:

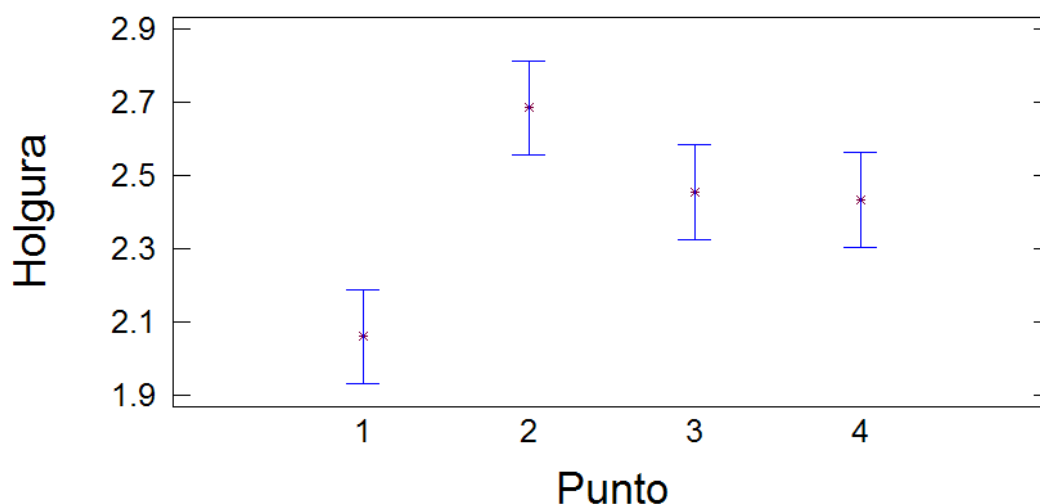
Del estudio de ANOVA podemos concluir que solo tiene sentido tener en cuenta los factores “Posición”, “Lado” y la interacción existente entre ambos



Además, tal y como podemos observar en el gráfico anterior de medias con interacción entre “Posición” y “Lado”, las diferencias entre las holguras del Lado Derecho al cambiar de posición no son significativas. Los intervalos de de confianza se solapan y por tanto en el lado Derecho no podemos descartar que las medias poblacionales sean iguales para las 2 posiciones (Superior e Inferior), sin embargo en el Lado Izquierdo se observan diferencias significativas cuando cambiamos de la posición Inferior a la Superior. Por lo tanto el efecto de la “Posición” en la variable respuesta (holgura) no es homogéneo en los 2 lados.

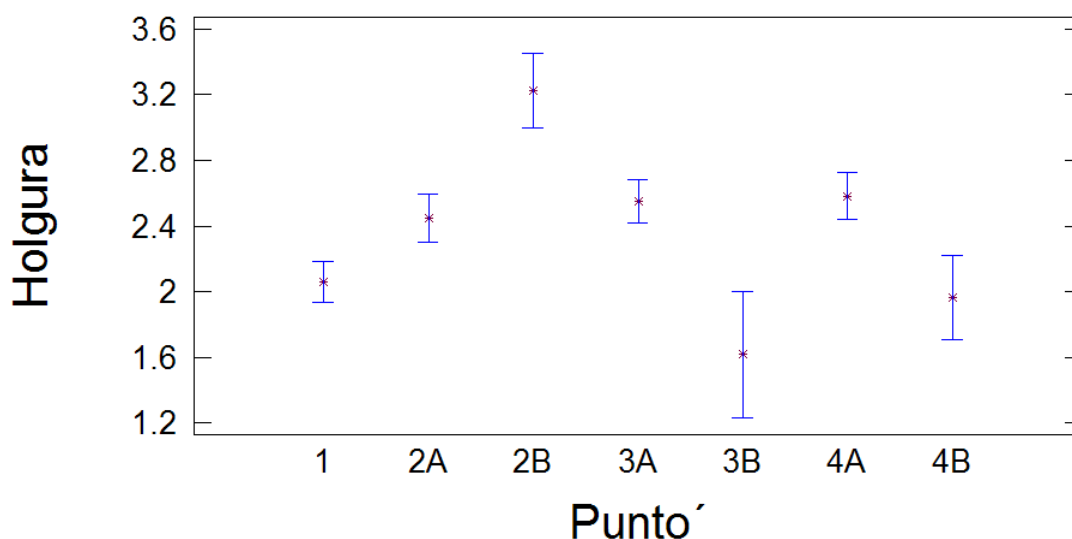
Teniendo en cuenta lo anterior decidimos estudiar la cuál era la diferencia en medias en las diferentes posiciones de media (factor “Punto”), lo que nos muestra la existencia de una diferencia de medias entre los puntos de medida es del orden de magnitud de 0.4-0.6 mm. Se puede observar en el gráfico siguiente.

Medias y 95.0 Porcentajes Intervalos LSD



Visto el resultado del ANOVA solo nos queda analizar la estabilidad con las herramientas del control estadístico de procesos y obtenemos finalmente el siguiente gráfico:

Medias y 95.0 Porcentajes Intervalos LSD



Como conclusión final hay que decir que se observa claramente que el punto 1, 3B y 4B tienen intervalos de medias que se solapan. Este solapamiento puede interpretarse como que la holgura media es la misma. Estos tres puntos representarían las situaciones en las que las holguras han estado en sus niveles más bajos. Es decir, estos datos históricos demuestran que en determinadas situaciones se ha sido capaz de producir holguras muy pequeñas durante ciertos periodos de tiempo, lo que nos llevaría a rastrear

con las fechas de las medidas y de la fabricación de los componentes y ensamblaje de ambos si se ha producido alguna situación especial o se ha seguido un patrón y poder así fabricar bajo unos nuevos parámetros y establecer unos nuevos límites de control para detectar desviaciones futuras.

Por otra parte, los puntos 2A, 3A y 4A tienen intervalos de medias (con el método LSD) que de nuevo se solapan. Puede interpretarse entonces que existe una situación en la que se producen holguras mayores, con un aumento de alrededor 0.5 mm. Esta coincidencia en el valor de holgura media hace pensar que se debe a algún factor que tal vez se pueda identificar rastreando de nuevo tal y como hemos explicado anteriormente.

Finalmente tenemos el punto 2B en el que su rastreo nos debe llevar a detectar situaciones que no deben repetirse.

➤ **PROPUESTA DE CONTROL**

Vistos los resultados obtenidos del análisis estadístico creo que es necesaria la implantación de un gráfico de control. Tal propuesta sería un gráfico CuSum con unos valores para las constantes $K=0.25$ y $H=8.01$ tales que seamos capaces de detectar cambios de 0.5 desviaciones típicas.

➤ **PROPUESTA NUEVO SISTEMA DE MEDIDA**

Durante la realización de este proyecto y en base a los resultados que se han ido obteniendo se ha conseguido la fabricación de un útil de medida (ver Fig. 6.1) que nos permita tomar medidas de los revestimientos en las diferentes fases para así poder determinar si existe algún factor que pueda modificar estas medidas de una fase a otra. La fabricación de este útil se ha llevado a cabo porque aunque parece un proceso sencillo y corto en el tiempo, pueden existir otros factores que no hayamos tenido en cuenta hasta ahora además de que el lead-time entre la fabricación de revestimientos y la unión de los cajones es de 8-9 meses complicando bastante la trazabilidad y la toma de decisiones ya que implican una mejoría (sí la decisión es acertada) en el mejor de los casos en un tiempo de 8-9 meses.



Figura 6.1 Medidas tomadas con el nuevo calibre (Documentación Proveedores)

Además atendiendo a una mejora en el proceso de fabricación se han fabricado unas nuevas cunas para el apilamiento de telas en la fabricación de los revestimientos. Estas cunas están fabricadas con Invar (es una aleación de acero, frente a las cunas actuales fabricadas con acero) buscando coeficientes de dilatación similares a los de la fibra de carbono para evitar así que dilataciones dispares provoquen desviaciones en la fabricación de la fibra.



Capítulo 7. **BIBLIOGRAFÍA**

Durante la elaboración de este proyecto fin de carrera se ha consultado la siguiente bibliografía:

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Peña, Daniel. **Regresión y diseño de experimentos**. Alianza Editorial. 2002.
- Cutler, John. **Estructura del Avión**. Editorial Paraninfo. 1984.
- Vilar Barrio, José F. **Cómo mejorar los procesos en su empresa. El control estadístico de procesos (SPC), herramienta fundamental en el incremento de la competitividad**. Fundación Confemental. 1999.
- Pérez, César. **Estadística Práctica con Statgraphics**. Prentice Hall. 2002
- Simons, David y Withington, Thomas. **Historia de la aviación**. Parragon Books Ltd. 2007.
- Pindado Carrión, Santiago. **Elementos de transporte aéreo**. E.T.S.I. Aeronáuticos. Universidad Politécnica de Madrid. 2006
- Del Campo Aguilera, Juan; Cuerno Rejado, Cristina; Martínez-Val Peñalosa Rodrigo; Pérez Cobo, Emilio. **Diseño Estructural de aviones**. Escuela técnica superior de ingenieros aeronáuticos. 2006.
- Martínez Val Peñalosa, Rodrigo; Pérez Cobo, Emilio; Cuerno Rejado, Cristina. **Cálculo de Aviones**. Escuela técnica superior de ingenieros aeronáuticos. 2007.
- Documentación técnica de Airbus.
- Documentación técnica de Boeing.

ENCICLOPEDIAS

- Enciclopedia Encarta Premium. 2009.



REFERENCIAS WEB

- <http://www.sitiosespana.com/directorio/h/historia-aviacion-espana.htm>
- <http://airvoila.com/historia-de-la-aviacion/>
- <http://www.eads.com/1024/es/eads/history/airhist/airhist.html>
- <http://www.aviacionulm.com/wright.html>
- <http://www.portalplanetasedna.com.ar/wright.htm>
- <http://www.manualvuelo.com/PBV/PBV14.html>
- http://www.asifunciona.com/aviacion/af_avion/af_avion1.htm
- <http://acd-pschiclana.comalis.org/?tag=empenaje>
- <http://patentados.com/invento/estabilizador-vertical-y-timon-de-direccion-de-avion.html>
- http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/es/Vertical_stabilizer
- <http://www.enigmaymisterios.com/AvionesdeCombate/partesdeunavion.htm>
- <http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/kaiser/esp/calidad/Cap5pdf.pdf>
(Documentación docente Ismael Sánchez)
- http://www.est.uc3m.es/esp/nueva_docencia/leganes/ing_telecomunicacion/metodos_mejora_calidad/MEMC/doc_generica/Practicas/Guion_ControlconMemoria.pdf
(Documentación docente Ismael Sánchez)